

特別研究報告

題目

同期型センサ情報収集機構を用いた
複数の収集進行波による高信頼通信機構の提案と評価

指導教員

村田 正幸 教授

報告者

岡部 孝介

平成 21 年 2 月 16 日

大阪大学 基礎工学部 情報科学科

同期型センサ情報収集機構を用いた
複数の収集進行波による高信頼通信機構の提案と評価

岡部 孝介

内容梗概

無線通信能力を備えたセンサ端末によってネットワークを構成し、遠隔地や広域を監視、観測、制御することのできるセンサネットワーク技術は、職住環境制御、ハイテク農業、防犯・防災などさまざまな分野での応用が期待されている。本報告では、住宅街の各戸に設置された電気メータから地域の基地局への検針情報収集のように、定期的に全センサ端末からセンサ情報を収集するアプリケーションシステムを対象とした通信機構を提案する。このようなアプリケーションでは、建物などによる電波の反射や回折、電子機器の発する電磁波による干渉、自動車や人などの障害物による動的な通信の品質の変動といった、不安定な無線通信環境下で、可能な限り早く、多くのセンサ情報を収集するための自律分散的なセンサ情報収集機構が必要不可欠である。我々の研究グループでは、このようなセンサネットワークのための効率的なセンサ情報収集機構として、同期型センサ情報収集機構を提案している。しかしながら、同期型センサ情報収集機構では、消費電力を抑制するための自律的なスリープ制御に主眼がおかれ、全センサ端末からセンサ情報を収集する際の収集遅延と収集率については考慮されていなかった。そこで本報告では、同期型センサ情報収集機構にもとづき、例えば 0.9999 といった高い収集率を低遅延で達成する機構を提案している。提案機構では、同期型センサ情報収集機構において、基地局から同一ホップのセンサ端末間で送信タイミングを調整することによって、ホップ間のセンサ情報送信の成功率を高めるとともに、複数の収集進行波を用い、前の収集進行波で転送に失敗したセンサ情報を続く収集進行波において再送することによって、収集率の向上を図る。さらに、センサネットワークの長寿命化のため、複数の収集進行波を前提としたセンサ情報収集における効率的なスリープ制御についてもあわせて提案する。提案機構の有効性をシミュレーションにより評価し、1000 台のセンサ端末からなるセンサネットワークにおいて、約 80 秒でセンサ情報収集率 0.9999 を達成するセンサ情報収集が可能であり、また、スリープ制御によって電力消費量を約 70 分の 1 に抑えられることを示す。

主な用語

センサネットワーク，情報収集，高信頼通信，パルス結合振動子，同期型センサ情報収集機構

目次

1	はじめに	7
2	対象とするアプリケーションシステム	10
2.1	センサネットワークの概要と求められる通信制御	10
2.2	高信頼通信を要求するアプリケーションシステム	11
3	同期型センサ情報収集機構	12
3.1	パルス結合振動子モデル	12
3.2	同期型センサ情報収集機構の概要	13
3.3	1回の収集進行波における通信信頼性の評価	19
3.3.1	シミュレーションモデルと評価指標	20
3.3.2	シミュレーション結果	20
4	同期型センサ情報収集機構における通信信頼性の向上	24
4.1	送信タイミングのランダム化による通信信頼性の向上	24
4.1.1	送信タイミングのランダム化手法	24
4.1.2	シミュレーションモデルと評価指標	24
4.1.3	シミュレーション結果	25
4.2	同期位相補正を用いた送信タイミングのランダム化による通信信頼性の向上	28
4.2.1	送信タイミングのランダム化における RFA を応用した同期位相補正	28
4.2.2	シミュレーションモデルと評価指標	29
4.2.3	シミュレーションによる動作確認と評価	29
5	複数の収集進行波による高信頼通信機構の提案	34
5.1	複数の収集進行波による高信頼通信機構の提案	34
5.2	シミュレーションモデルと評価指標	34
5.3	シミュレーション結果	36
6	複数の収集進行波による高信頼通信機構のための自律分散型スリープ制御機構	41
6.1	スリープ制御情報	42
6.2	ACK を用いたスリープ制御情報伝播手法	43
6.3	スリープ制御情報を用いた情報収集開始タイミングの同期	44
6.4	シミュレーションモデルと評価指標	46
6.5	シミュレーション結果	47

7 おわりに	50
謝辞	51
参考文献	52

目 次

1	PRC による振動子の位相変位	14
2	パルス結合振動子モデルにおける同期状態と進行波状態	15
3	同期型センサ情報収集機構における収集進行波	16
4	本報告で用いる PRC Δ_s	17
5	同期型センサ情報収集機構におけるメッセージ送信, スリープ	19
6	CSMA/CA の送信フローチャート	21
7	1 回の収集進行波における収集漏れ率	22
8	1 回の収集進行波における収集漏れ率と収集遅延の関係	22
9	送信タイミングのランダム化手法における送信タイミング γ_i	25
10	1 回の収集進行波における収集漏れ率 (手法 2)	26
11	送信タイミングのランダム化手法における送信タイミング γ_i (手法 3)	26
12	1 回の収集進行波における収集漏れ率 (手法 3)	27
13	送信タイミングのランダム化によるセンサ端末の位相のずれ	28
14	同期位相補正による同期ずれの解消	30
15	同期位相補正を適用した場合の 1 回の収集進行波における収集率	32
16	同期位相補正を適用した場合の 1 回の収集進行波における収集漏れ率と収集遅延の関係	33
17	同期位相補正を適用した場合の各手法の 1 回の収集進行波における収集率 (センサ端末数 1000 台)	33
18	複数の収集進行波における収集進行波数ごとの収集漏れ率 (手法 1)	35
19	複数の収集進行波により要求収集率を満たす収集遅延 (手法 1)	36
20	複数の収集進行波により要求収集率 0.9999 を達成するための収集遅延 (センサ端末数 250 台)	38
21	複数の収集進行波により要求収集率 0.9999 を達成するための収集遅延 (センサ端末数 1000 台)	39
22	複数収集進行波を用いる高信頼通信における自律分散型スリープ制御	42
23	ACK によるスリープ制御情報伝播例	43
24	ACK によるスリープ制御情報の伝達	45
25	スリープ制御機構による情報収集周期, タイミング, 収集進行波数の設定の様子	48
26	スリープ制御機構におけるアクティブ比	49

表目次

1	シミュレーションにおけるパラメータ設定	21
---	-------------------------------	----

1 はじめに

近年、無線通信能力を備えたセンサ端末を多数配置してネットワークを構成することにより、遠隔地や広域を監視、観測、制御することのできる、センサネットワークが多くの研究者、開発者の注目を集めている [1]。個々のセンサ端末はネットワークの用途に応じた温度、湿度、加速度などのアナログまたはデジタルセンサ、低消費電力プロセッサ、小容量メモリ、無線送受信機能を有しており、多くの場合、容量が有限な電池により駆動する [2]。電池の交換や充電の手間やコストを抑えつつ、電力容量が限られたセンサ端末からなるセンサネットワークを長期間運用するためには、電力消費を抑えた通信制御が必要となる。仮に太陽電池やコンセントなどから電力を供給できるセンサ端末であっても、システム運用におけるランニングコストの観点から、電力消費は低くあればあるほど好ましい。さらに、無線通信容量が限られること、センサ端末は無線信号の送受信に多くの電力を消費することからも、すべてのセンサ端末の状態情報を収集し、センサネットワーク全体を制御するような集中型の制御機構は現実的ではない。また、多くのセンサ端末が配置され、さらにセンサ端末の追加や、電力の枯渇や故障などによるセンサ端末の停止、さらにセンサ端末の移動などが生じることを考慮すると、センサネットワークの制御機構は拡張性、柔軟性、耐故障性を有することが求められる。したがって、センサネットワークにおいては、センサ端末自身による観測や周囲のセンサ端末の情報交換によって得られる局所的な情報にもとづく、センサ端末による自律分散的な制御が望ましい。

我々の研究グループでは、トポロジや通信状態が時々刻々と変化するセンサネットワークにおいて、電力効率よく定期的な情報収集を行う自律分散型の同期型センサ情報収集機構を提案している [3, 4, 5, 6, 7]。同期型センサ情報収集機構は、全センサ端末から単一の基地局へ定期的にセンサ情報を収集するアプリケーションを対象としており、基地局により近い隣接センサ端末がセンサ情報を送信しようとするタイミングに合わせて、基地局からさらに 1 ホップ遠いセンサ端末がセンサ情報を送信するようにスケジューリングすることにより、センサネットワークの周縁部から順にセンサ情報が転送される波状の通信が行われる。このようなスケジューリングにより、それぞれのセンサ端末は自身のセンサ情報送信の前後の短時間だけアクティブ状態になればよく、効率的なスリープ制御と消費電力の抑制が実現される。また、同期型センサ情報収集機構におけるスケジューリングは、センサ端末間の相互作用によって自己組織的に達成され、センサ端末の故障に対する耐故障性、センサ端末の停止や追加、移動に対する適応性、情報収集の周期変更に対する柔軟性を有する。

一方、いくつかのアプリケーションでは、長期間運用のための省電力性だけでなく、それぞれの情報収集においてできるだけ早く、確実にセンサ情報を収集したいという要求がある。例えば、住宅街の各戸の電気メータに無線通信能力を付加し、電気使用量などの情報を、そ

の地域の基地局へ無線ネットワークで収集するようなアプリケーションでは、電気使用料金の算出、請求のため、情報収集率は例えば0.9999のように限りなく1に近い値でなくてはならない。また、スマートメータ [8] のような電力事業者による電力利用変化に応じた電力供給量の制御や、停電や故障検知を行うアプリケーションでは、逐次的に全ての、あるいは一部のセンサ端末から低遅延で情報を収集することが求められる。同期型センサ情報収集機構では、センサ情報発信のタイミングを同じホップのセンサ端末間で同期させることにより効率的なスリープ制御を実現しており、そのため、同一ホップのセンサ端末間で通信の衝突、干渉が生じる可能性が高い。我々の研究グループでは衝突回避を行うことによって同期型センサ情報収集機構のセンサ情報収集率を向上する機構を提案してきたが、いずれも0.9999という高収集率を達成するには十分でなく、遅延についても考慮していない [6, 7]。

同期型センサ情報収集機構では、例えば1時間に1回といった情報収集の周期にあわせてセンサ端末が動作し、周縁部から基地局へ向けて順にセンサ情報が転送される波状の通信が行われる。以後、この波状のセンサ情報の伝達を収集進行波と呼ぶ。1回の収集進行波でアプリケーションが要求する収集率が得られなくとも、1回の情報収集に対して複数の収集進行波を発生させることができれば、2回目以降の収集進行波でそれまでの収集進行波で送信できなかったセンサ情報を収集することにより、要求収集率を達成できると考えられる。また、収集進行波の回数が増えるにつれて、収集進行波あたりに送信されるセンサ情報数が減るため、衝突確率が漸減し、ホップ間の通信成功率が高まることが期待できる。しかしながら、一方で、所望の高収集率を達成するための収集進行波の数が増えるにつれて収集遅延が増大してしまう。

そこで、本報告では、同期型センサ情報収集機構にもとづき、複数の収集進行波によって、低遅延で高収集率の定期的なセンサ情報収集を実現するための高信頼通信機構を提案する。提案手法では、例えば1時間おきといった情報収集周期にあわせて、1時間ごとにセンサ端末が周期的に同期動作して1回の収集進行波を発生させる、同期型センサ情報収集機構を拡張し、情報収集周期ごとに複数の収集進行波を発生させる。さらに、収集進行波あたりのセンサ情報収集率の向上のため、同じホップのセンサ端末間でセンサ情報の送信タイミングをずらす手法についてもあわせて提案する。また、1回の情報収集あたりの複数の収集進行波の間隔は情報収集周期と比較して非常に短いため、単に同期型センサ情報収集機構における情報収集周期を短くするだけでは、情報収集と無関係な時間にもセンサ端末が動作しなければならず、電力効率が著しく低下してしまう。そのため、効率的なスリープ制御と複数の収集進行波の連続発生を両立させる仕組みについても提案する。

以降、2章では本報告で対象とする高信頼通信を要求するアプリケーションシステムの特徴、実現のための課題を示し、3章では我々のグループが提案する同期型センサ情報収集機構の概要と、その通信信頼性の評価を行う。評価結果にもとづき、4章では1回の収集進行

波での通信信頼性の向上手法の提案と評価を行い，さらに5書で複数の収集進行波による高信頼通信機構の提案と評価を行い，その有効性を示す．6章では高信頼通信機構に適したスリーブ制御手法の提案とシミュレーションによる基本動作確認を行う．最後に7章で本報告のまとめ，および今後の課題について述べる．

2 対象とするアプリケーションシステム

本報告で対象とするアプリケーションシステムは、センサネットワークで一般的に要求される長期間運用のための省電力性に加え、全てのセンサ端末からの定期的な情報収集における低遅延かつ高収集率を達成するための高信頼通信を要求するという特徴を持つ。この章では、まずセンサネットワークの概要と通信機構への一般要件を説明し、次に、本報告で対象とするアプリケーションシステムの特徴と実現のための課題を示す。

2.1 センサネットワークの概要と求められる通信制御

センサネットワークは、温度、湿度、加速度、磁気、水位などを測定するためのセンサ、計算能力の限られたプロセッサ、小容量メモリ、無線送受信機能を有する小型のセンサ端末を多数配置し、それらによるネットワークを構成することで、刻々と変化する環境情報の取得、広域に関する情報の同時把握や機器の制御を行うシステムである。センサの獲得した情報は、無線通信により基地局に集められ、基地局は収集したセンサ情報を利用者に提示する。センサネットワークは、動物の生態観測、洪水予測のための降雨量観測、効率的な空調制御のための温度や湿度分布のリアルタイム観測、工場内の各種機器のヘルスチェックなど、工業、農業、流通、職住環境制御、防犯・防災といった広範囲な分野への応用が可能である [9]。また、近年の MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術の向上によるセンサ端末の小型化、無線通信技術の向上、低消費電力化に伴い、さらに多くのアプリケーションの実現可能性が示されており、その実用化には大きな期待が持たれている [1]。

設置の容易性などの理由から、センサ端末は多くの場合電池駆動である。数が多いこと、また、アプリケーションによっては無作為に配置される、あるいは火山や深海などの人が容易に立ち入れない場所に配置されることなどから、電池の管理や交換は困難であるため、センサネットワークを長期間運用するためには、電力消費を抑えた通信制御が必要となる。また、多数のセンサ端末が配置され、配置後もセンサ端末の追加や、電力の枯渇などによるセンサ端末の停止や故障、センサ端末の移動、さらに通信品質変動が生じることを考慮すると、センサネットワークの通信制御機構は、センサ端末数や領域の広さへの拡張性、通信品質の変化やセンサ端末の追加、停止、移動によるトポロジ変化に対する適応性、一部のセンサ端末の停止に際して一時的な性能低下を許容しつつもセンサネットワークとしての継続稼働を保証する耐故障性を有することが求められる。さらに、無線通信容量に限られること、センサ端末は主として無線信号の送受信に電力を消費することから、すべてのセンサ端末の状態情報を収集し、センサネットワーク全体を制御するような集中型の制御機構は現実的でなく、センサ端末自身による観測や周囲のセンサ端末間の情報交換によって得られる局所的な情報にもとづく、センサ端末による自律分散的な制御が望ましい。なお、センサネットワー

クにおいては、適切なセンサ端末によって対象を観測し続けるためのカバレッジ制御，ネットワークの接続性を保つためのコネクティビティ制御，任意の，または特定のセンサ端末間の通信経路を確立，維持するための経路制御，さらに，やりとりされるセンサ情報の秘匿性を保証するためのセキュリティ制御などのさまざまな技術課題が挙げられるが [10, 11]，本報告では，全てのセンサ端末から基地局へのセンサ情報収集における通信制御に焦点を当てており，これらの課題については検討不要，または検討の対象としない．

2.2 高信頼通信を要求するアプリケーションシステム

本報告で対象とするアプリケーションシステムは，前節で述べた長期間運用のための省電力性，拡張性，適応性，耐故障性，自律分散の要求に加え，定期的な全センサ端末からのセンサ情報の収集における低遅延かつ高収集率を達成するための高信頼通信を必要とする．

このようなアプリケーションシステムの一例として，住宅街の各戸の電気メータに無線通信能力を付加し，電気使用量などの情報を，その地域に設置された基地局へセンサネットワークを用いて収集する検針情報収集システムが挙げられる．検針情報収集システムでは，無線センサーネットワークにより基地局に収集された検針情報は，電力会社に転送され，電気使用料金の算出，請求に用いられるため，限りなく 1 に近い収集率が要求される．また，一定時間ごとに検針情報を収集して時間帯や地域別の逐次的な利用電力量分析を行い，電力利用変化に応じた電力供給量の動的制御を行うスマートメータ [8] では，低遅延で情報を収集することが求められる．さらに，停電や機器故障の発生を迅速に検知するためにも，低遅延な情報収集を達成しなくてはならない．

一方，検針情報収集システムの利用環境に注目すると，住宅街における建物などによる電波の反射や回折，電子機器の発する電磁波による干渉，自動車や人などの障害物による動的な通信の品質の変動が発生しやすく，トポロジが変化しやすい．電気メータの設置間隔をおよそ 2~10m 程度，最大通信伝達距離を 20m，センサ端末の通信範囲内には約 8 台のセンサ端末が存在すると仮定すると，700m 四方に 1 台の基地局を設置したとき，3000 台のセンサ端末からなるおよそ 40 ホップのネットワークが構成されることになることから，センサネットワークのトポロジや通信状態が長期にわたって安定することは考えがたく，また，高信頼通信のためのネットワーク制御の集中最適化も困難である．

3 同期型センサ情報収集機構

本報告では、我々の研究グループで提案している同期型センサ情報収集機構 [3, 6] を拡張することによって、全センサ端末からの定期的なセンサ情報収集の高信頼通信を達成する。同期型センサ情報収集機構は、アプリケーションが望む周期で、基地局から最も遠いセンサネットワーク周縁のセンサ端末がセンサ情報の送信を開始し、順次センサ情報の集約を行いながらセンサ情報を転送することで、情報収集が行われる。

本章では、まず同期型センサ情報収集機構における自己組織的な同期制御に応用されているパルス結合振動子モデルの説明を行い、次に同期型センサ情報収集機構の概要を説明し、最後にその通信信頼性についてシミュレーションにより評価を行う。

3.1 パルス結合振動子モデル

生物界では集中型の制御機構を用いることなく、相互作用により同期を実現しているものが多数みられる。例えば、ある種の蛍の群れは同期した発光を繰り返すが、これは、それぞれの個体が、周囲の他の個体の発光に刺激を受けて、自らの発光周期を定める体内タイマを少し進めるといって、簡単な相互作用によって達成される。パルス結合振動子モデルはこのような個体間の相互作用による同期現象を説明する数学モデルである [12]。本報告では、文献 [13] で提案されたパルス結合振動子モデルを用いる。

N 個の振動子 $O = O_1, \dots, O_N$ を考える。振動子 O_i の位相 $\phi_i \in [0, 1]$ は、周期 T_o で 0 から 1 に遷移し、1 に到達すると 0 となる。単位時間当たりの位相変化量は $\frac{d\phi_i}{dt} = \frac{1}{T_o}$ である。位相 ϕ_i が 1 に到達したときに振動子 O_i は発火し、振動子 O_i と結合関係にある振動子 O_j は刺激を受け、位相が次式により変位する。

$$\phi_j \rightarrow \phi_j + \Delta(\phi_j) \quad (1)$$

式 (1) の関数 Δ は、PRC (Phase-Response Curve : 位相応答曲線) と呼ばれ、刺激による変位量を与える。例えば、QIF (quadratic integrate-and-fire) モデルでは、 $\Delta_{\text{QIF}}(\phi) = -\frac{a}{2\pi}(1 - \cos 2\pi\phi)$ 、RIC (radial isochron clock) モデルでは、 $\Delta_{\text{RIC}}(\phi) = a \sin 2\pi\phi$ が用いられる [13]。

結合関係にある振動子 O_i から、ある位相 ϕ_j において刺激を受けた振動子 O_j の新しい位相 ϕ_j を導出する関数 $h(\phi)$ を $h(\phi) = \phi + \Delta(\phi)$ とするとき、振動子 O_j が振動子 O_i から位相 ϕ_j に 1 回目の刺激を受けた後、2 回目の刺激を受けるときの位相は $h(\phi_j)$ であり、位相 $h(h(\phi_j))$ に 3 回目の刺激を受ける。したがって、 n 回目の刺激を受けるときの振動子 O_j の

位相は $\phi_j = h^{n-1}(\phi_j)$ で与えられる．このような刺激による振動子 O_j の位相 ϕ_j の変位の様子を図示したものが図 1(a) (QIF モデル) と図 1(b) (RIC モデル) である．

図中の実線は $\phi = h(\phi)$ を表し，破線の矢印は振動子 O_j が刺激を受けるたびに位相が変位する様子を表している．図 1(a) では，刺激を受けるたびに刺激を受けるときの位相が 1 に近づき，いずれ結合関係にある振動子 O_i と振動子 O_j の位相が一致し，同時に発火するようになる．この状態を同期状態と呼ぶ (図 2(a))．一方，図 1(b) では，振動子 O_j の初期位相が $\phi_j < \phi_c$ の場合は，刺激を受けるたびに位相 $h(\phi)$ が大きくなるが，初期位相が $\phi_j > \phi_c$ の場合は，刺激を受けるたびに位相が小さくなる．したがって，いずれの初期位相からも刺激を受け続けることによって振動子 O_j の位相 ϕ_j は ϕ_c ($0 < \phi_c < 1$) に収束することがわかる．収束状態では，振動子 O_i と振動子 O_j の間には固定の位相差が保たれるようになり，振動子 O_i が発火した後， $1 - \phi_c$ 後に振動子 O_j が発火することを繰り返す．これを進行波状態と呼ぶ (図 2(b))．

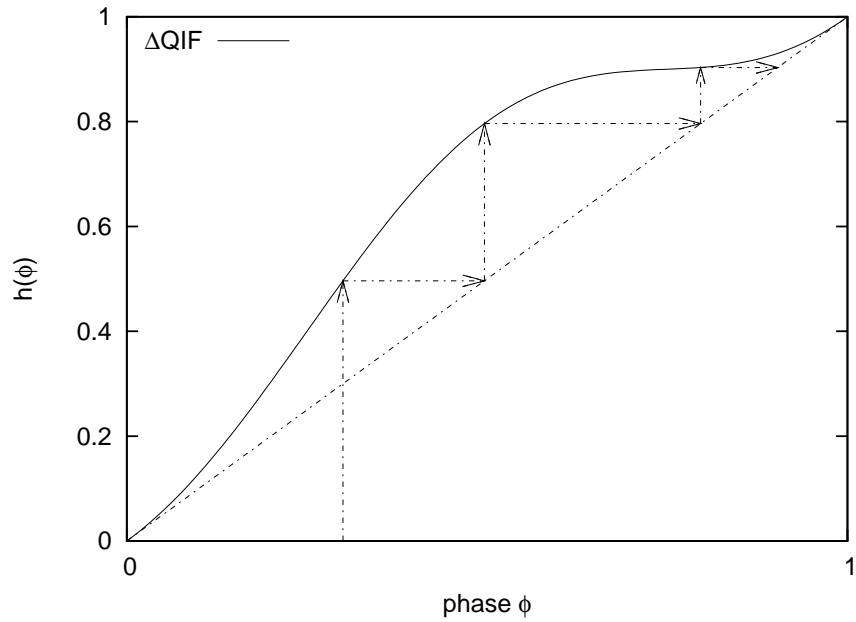
このように，パルス結合振動子モデルでは，振動子間の相互作用によって同期状態または進行波状態が自己組織的に達成，維持される．また，PRC を調整することで，任意の初期位相の振動子集合から，意図する同期状態，進行波状態を達成することが可能である．

3.2 同期型センサ情報収集機構の概要

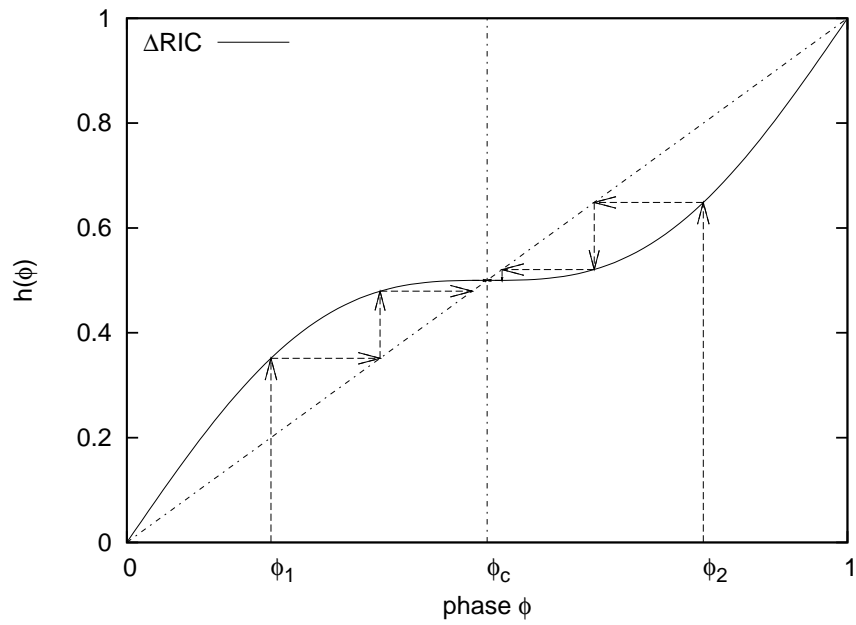
センサ端末の無線送受信器の性能や送受信電力の制限から，センサ端末が通信可能な距離は限られる．また，離れた基地局やセンサ端末と通信するためには大きな送信電力が必要となることから，センサネットワークにおいては，送信電力を抑制し，隣接のセンサ端末間の通信で順次基地局へとセンサ情報を転送していくマルチホップ通信が用いられる．

マルチホップ通信によりセンサネットワーク内の全センサ端末からセンサ情報収集を行う際には，それぞれのセンサ端末が，自身より基地局から遠い隣接センサ端末のセンサ情報を受信した後に，自身のセンサ情報と集約し，基地局に近い隣接センサ端末に集約したセンサ情報を送信すればよい．しかしながら，基地局からより遠い隣接センサ端末の情報発信のタイミングが不明，またはばらばらな場合には，センサ端末は長期間受信状態を維持しなければならず，待機中の電力消費量が問題となる．一方，基地局からより遠い隣接センサ端末が同じタイミングで情報発信を行えば，センサ端末はその期間だけ受信器電力を入れればよい．さらに，センサ情報の受信に引き続いてセンサ情報集約，送信が行えれば，より効率的に送受信器電力を制御することができる．同期型センサ情報収集機構では，このようなタイミング制御を行うことにより，ネットワークの周縁から順次センサ情報が転送される波状の情報収集が達成される．

例えば図 3 において，BS は基地局を，各丸はセンサ端末を表しており，点線の円はセン

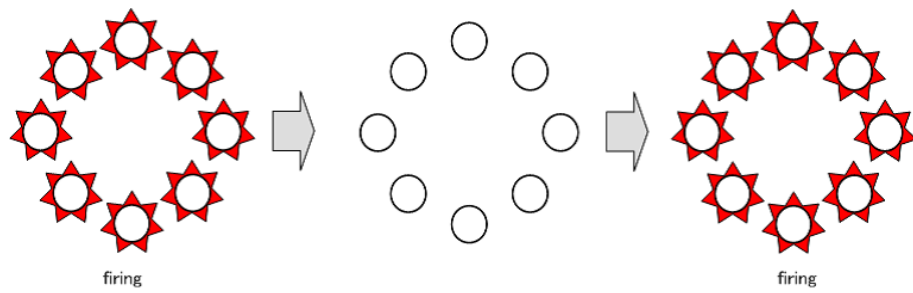


(a) 同期状態に達する場合 (QIF モデル)

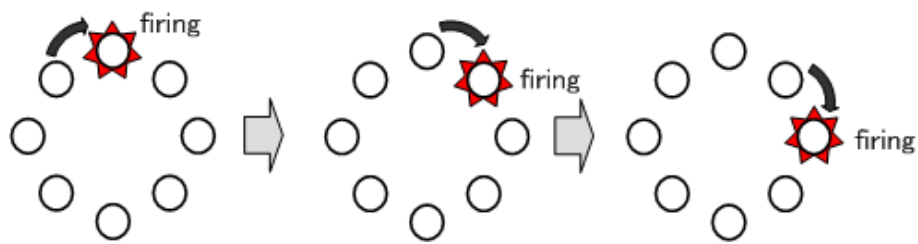


(b) 進行波状態に達する場合 (RIC モデル)

図 1: PRC による振動子の位相変位



(a) 同期状態



(b) 進行波状態

図 2: パルス結合振動子モデルにおける同期状態と進行波状態

サ端末の通信範囲を示す．同期型センサ情報収集機構では，センサ端末の基地局からのホップ数をレベルと呼ぶ．すなわち，基地局からの通信範囲内に存在する灰色のセンサ端末のレベルは1，白色のセンサ端末はレベル2，黒色のセンサ端末はレベル3である．このセンサネットワークでは，センサ情報収集の周期にあわせて，まずレベル3のセンサ端末がセンサ情報を発信する（左上）．レベル2のセンサ端末は，スケジューリングによって，レベル3のセンサ端末の情報発信にあわせて受信状態になっており，センサ情報を受信することができる．レベル2のセンサ端末は，受信したセンサ情報を自身のセンサ情報と集約した後，他のレベル2のセンサ端末と同期してセンサ情報を発信する（左下）．このセンサ情報はさらにレベル1のセンサ端末によって集約，中継され，基地局に到達する（右下）．したがって，センサネットワーク全体で見ると，センサ情報の発信が，レベル3のセンサ端末，レベル2のセンサ端末，レベル1のセンサ端末というように，センサネットワークの周縁部から順に行われる，収集進行波が形成される．基地局は後述するように，センサ情報の収集周期を制御するためのペースメーカーの役割を果たしており，ビーコン信号を収集周期にあわせて定期的に発信する（右上）．

同期型センサ情報収集機構では，このような効率的なセンサ情報収集のタイミング制御を，パルス結合振動子モデルの進行波状態を応用することによって，自己組織的に実現して

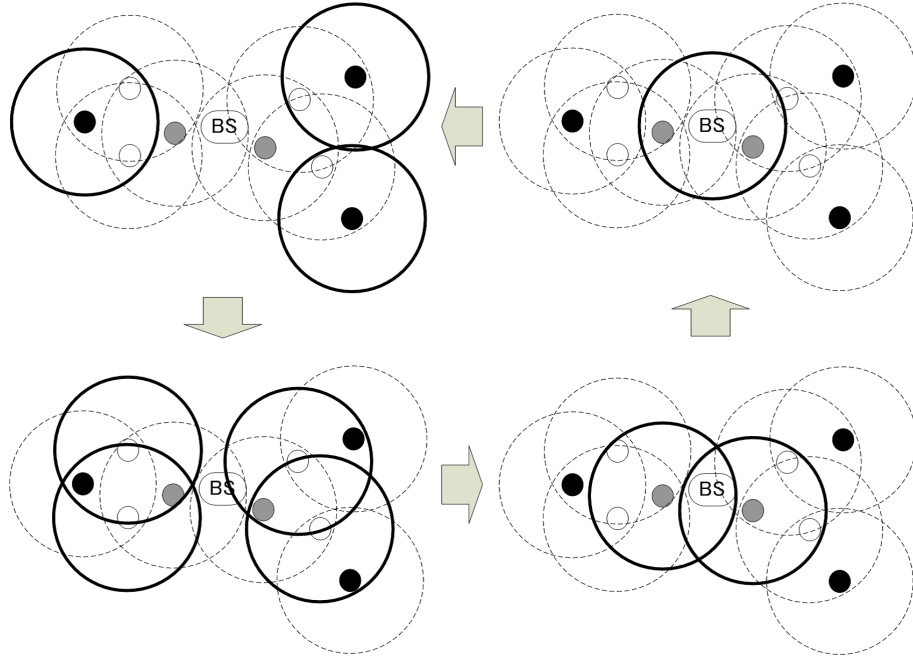


図 3: 同期型センサ情報収集機構における収集進行波

いる． N 個のセンサ端末を $S_i = \{S_1, \dots, S_N\}$ と表す．センサ端末 S_i のレベルを l_i とし，初期状態では十分に大きな値とする．センサ端末 S_i はタイマ位相 ϕ_i ($\phi_i \in [0, 1]$, $\frac{d\phi_i}{dt} = \frac{1}{T_o}$) を管理しており，位相 ϕ_i は時間の経過とともに 0 から 1 に遷移し，1 に達するとセンサ端末 S_i は発火，すなわちメッセージを発信し，位相 ϕ_i は 0 に戻る． T_o [秒] をタイマ周期と呼び，アプリケーションの指定する情報収集周期と同じに設定される．センサ端末 S_i が 1 つレベルの小さいセンサ端末 S_j ($l_j = l_i - 1$) の発火よりも位相差 δ ($0 < \delta < 1/3$) だけ早く発火するための PRC の条件は以下で与えられる [6]．

$$\begin{cases} 0 < \Delta(\phi) \leq \delta - \phi & (0 \leq \phi < \delta) \\ \Delta(\phi) = 0 & (\phi = \delta) \\ \delta - \phi \leq \Delta(\phi) < 0 & (\delta < \phi < 1) \end{cases} \quad (2)$$

この条件を満たす PRC として，本報告では次式を用いる．

$$\Delta s(\phi) = -a \sin(\pi(\phi - \delta)) - b(\phi - \delta) \quad (3)$$

PRC $\Delta_s(\phi)$ のパラメータ a , b の値が大きければ大きいほど，刺激を受けた際の位相の変位が大きくなり，より早く進行波状態が達成される (図 4)，本報告では $a = 0.10$, $b = 0.5$

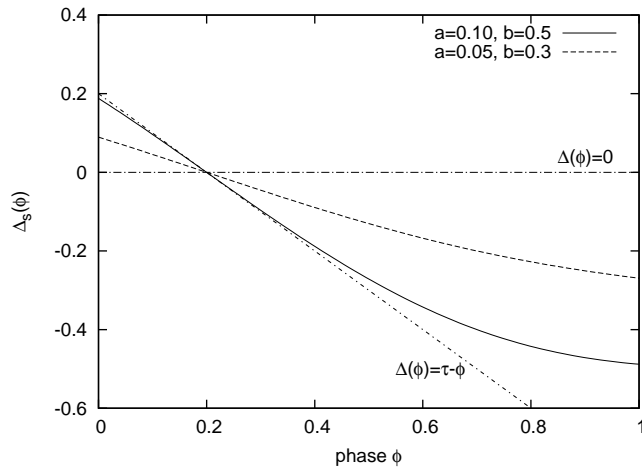


図 4: 本報告で用いる PRC Δ_s

とする．また，位相差 δ をオフセットと呼び，センサネットワーク全体で共通の値が用いられる．

センサ端末 S_i の発信するメッセージには，センサ端末 S_i よりもレベルが 1 つ大きい隣接センサ端末から受信したセンサ情報と自身のセンサの獲得したセンサ情報を集約したもの，およびレベル l_i が含まれる．センサ情報の集約を行うことにより，メッセージサイズに応じた送受信電力の削減と，通信回数の低下による通信の衝突・干渉の低減，さらに収集率の向上が見込まれる [14]．

センサ端末 S_i のレベル l_i は，そのセンサ端末の受信したメッセージのレベルの最も小さいものを l_j としたとき， $l_i = l_j + 1$ である．基地局が発信するビーコン信号のレベルは 0 である．したがって，センサ端末配置直後の初期状態から，まず基地局からの通信範囲にあるセンサ端末のレベルがビーコンを受信することで 1 となり，このレベル値を含むメッセージを受信することで，基地局から 2 ホップ目のセンサ端末のレベルが 2 に設定される．以降，時間が経つにしたがって正しいレベルが伝播し，すべてのセンサ端末が自身の正しいレベルを知ることができる．

レベルが初期値から変更されて以降，センサ端末は受信したメッセージのレベルと自身のレベルを比較し，その結果に応じた受信処理を行う．センサ端末 S_i がセンサ端末 S_j の送信したメッセージを受信したとする．レベル $l_j = l_i + 1$ の場合，センサ端末 S_j はセンサ端末 S_i よりも 1 ホップ基地局から離れており，センサ情報の中継が必要なため，センサ端末 S_i はセンサ端末 S_j のセンサ情報をバッファに蓄積する．レベル $l_j = l_i$ の場合，センサ端末 S_j が基地局から同ホップに位置することから，センサ端末 S_i は受信したメッセージを無視する．レベル $l_j = l_i - 1$ の場合，センサ端末 S_i は刺激を受け，位相を変化させる．なお，通

信範囲内にある他のレベル $l_i - 1$ のセンサ端末から複数回の刺激を受けることのないよう、時刻 t に刺激を受けた後、時刻 $t + \delta$ まではレベル $l_i - 1$ の他のセンサ端末からの刺激を受けない。

なお、同期型センサ情報収集機構では、メッセージの送信はブロードキャスト通信によって行われ、通信範囲内の全てのセンサ端末がメッセージを受信可能であるが、本報告では後述のように MAC (Medium Access Control) 層の再送を行うため、ユニキャストを用いるよう、次のように動作を変更する。センサ端末 S_i は、レベル $l_i - 1$ の隣接センサ端末ごとにメッセージの受信電力を測定、管理している。この受信電力の情報はメッセージを受信するごとに更新され、一定時間メッセージを受信しないと当該センサ端末の情報を削除する。センサ端末 S_i は、自らのメッセージ送信のタイミングで、管理している受信電力情報にもとづき、受信電力が最も大きいレベル $l_i - 1$ の隣接センサ端末を親センサ端末に選択し、メッセージをユニキャスト送信する。したがって、センサ端末は、自身を親センサ端末としてユニキャスト送信されたメッセージのセンサ情報のみを転送する。なお、センサ端末が、レベルが 1 小さいセンサ端末のメッセージ送信によって刺激を受け、同期が達成できるよう、センサ端末は、レベルが 1 小さいセンサ端末からその親センサ端末へのユニキャスト送信されたメッセージを promiscuous モードによって受信する。

センサネットワークの長寿命化のためには、センサ端末が不要な機器や回路の電源を切ることが有効である。同期型センサ情報収集機構では、同期が確立されるまでは、他のセンサ端末からの刺激を受けるため、受信器電源を常に入れておかななくてはならない。しかしながら、いったん同期が確立され、メッセージ送受信のタイミングが確定した後は、位相 ϕ_i が δ から $1 - \delta$ の間は送受信器ともに電源を切り、節電を行うことが可能である。すなわち、デューティ比は 2δ となる。ただし、位相 $\phi_i = \delta$ のタイミングでレベルが 1 小さいセンサ端末からのメッセージを受信しなかった場合は、同期が失われたものとみなし、再度同期が確立されるまで受信状態を続ける。同期が確立した後のセンサ端末の動作周期とメッセージ送受信の様子を図 5 に示す。図に示されるように、周期 T_0 ごとにレベル 3 のセンサ端末から順にメッセージが送信され、センサ情報が基地局へと伝播していき、また、センサ端末は、メッセージ受信のため位相が 1 になるよりも位相 δ だけ早くアクティブ状態になり、メッセージを送信した後、刺激を受けるために位相 δ だけアクティブ状態を継続し、残りの不用な期間はスリープにより電力消費を抑えている。

同期型センサ情報収集機構は、センサ端末の追加、停止、移動への適応性を有する。新たに追加されたセンサ端末は、受信器電源を入れ、周囲のセンサ端末のメッセージを受信することによって、レベルを正しく設定し、刺激を繰り返し受けることによってセンサネットワーク内の位置に応じた適切な同期を達成することができる。また、センサ端末が停止した場合には、レベルが 1 つ大きいセンサ端末は通信範囲内にある停止したセンサ端末と同じレベ

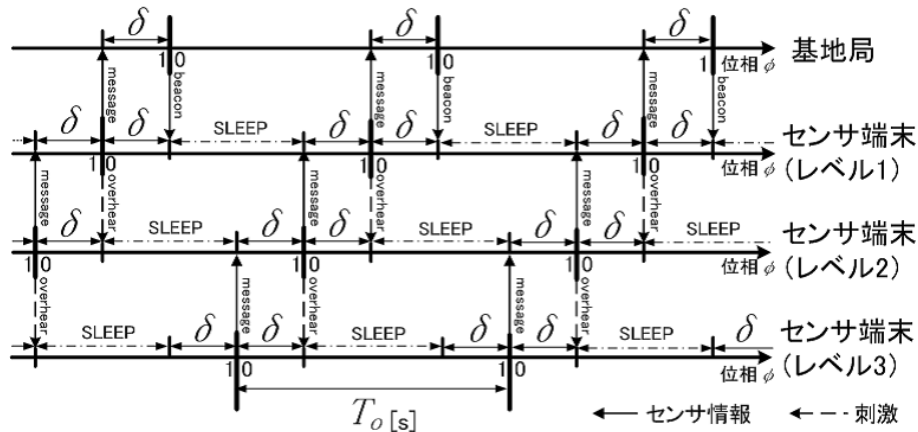


図 5: 同期型センサ情報収集機構におけるメッセージ送信, スリープ

ルのセンサ端末から刺激を受ければよく, センサ端末の停止により通信範囲内に自身よりレベルが1つ小さいセンサ端末が存在しなくなった場合には, レベルを初期化し, 再設定すればよい.

3.3 1回の収集進行波における通信信頼性の評価

情報収集あたりの収集率を向上するためには, 1レベル異なるセンサ端末間の通信, すなわちホップ間のメッセージ転送成功率を高める必要がある. CSMA/CA 無線通信におけるメッセージ転送成功率を向上するためには, FEC (Forward Error Correction) によるエラー訂正や, ACK による再送などの手段が有効であるが, 本報告では ACK による再送を行うものとする. ただし, 同期型センサ情報収集機構では, 図5で示されるように, センサ端末 S_i がレベルが1つ小さい親センサ端末にメッセージを送信できる位相区間は $0 \leq \phi_i < \delta$ に限られる. すなわち, センサ端末 S_i は位相 ϕ_i が1となった時刻に位相を0に初期化するとともにメッセージ送信を開始し, 送信に失敗した場合には, 位相 ϕ_i が δ になるまで再送を繰り返す. 以降では, この送信可能時間を $\tau = \delta T_o$ [秒] と表記するものとする.

1回の収集進行波における収集遅延 T_{app} は, センサネットワークの最大レベルを k としたとき, 次式で求められる.

$$T_{app} = k\tau \quad (4)$$

アプリケーションの要求する高収集率を達成するには, 送信可能時間を大きくし, より多くの再送を許すことによってホップ間のメッセージ転送成功率を高めるのが効果的であるが, 一方で, 式(4)に示されるように収集遅延が大きくなってしまふ. そこで本節では, 同期型

センサ情報収集機構において、送信可能時間と、1回の収集波で達成できる収集率、収集遅延の関係をシミュレーションにより評価する。

3.3.1 シミュレーションモデルと評価指標

通信距離が 20 m のセンサ端末 250 個を 200 m 四方のフィールドにランダムに配置する。基地局は中央に配置する。なお、シミュレーションにおける最大レベルは 13 であった。すべてのセンサ端末から、センサ端末ごとにユニークな 1 つのセンサ情報を、同期型センサ情報収集機構で収集する。

センサ端末は、MAC 層プロトコルとして、IEEE802.15.4 のノンビーコンモード (CSMA/CA) を用いてメッセージ送信を行う。CSMA/CA における送信フローを図 6 に示す [15]。ただし、送信可能時間 τ の間、繰り返し再送が行えるように、最大バックオフ回数 M を無限大とする。また、IEEE802.15.4 の ACK により、センサ端末はメッセージの転送成功確認を行う。したがって、センサ端末は、メッセージ送信が完了するか、位相が δ になるまで、メッセージの送信を試みる。なお、メッセージあたりに集約可能な最大のセンサ情報数を a とし、センサ端末が a 個を超えるセンサ情報を保有している場合にはそれらを複数のメッセージに分割格納し、1 回の送信タイミングで連続送信する。シミュレーションのパラメータを表 1 に示す。なお、backoff unit、最大バックオフ回数、センサ情報最大集約数、オフセットを除き、IEEE802.15.4 の規定値を用いる。初期状態では、すべてのセンサ端末の初期位相をランダムに、レベルを十分に大きな値に設定する。センサネットワーク全体で同一レベルのセンサ端末の位相同期が定常状態となったタイミングから、センサネットワークの周縁の最もレベルの大きなセンサ端末から基地局に向けた、1 回の収集進行波によってセンサ情報を基地局に収集する。

評価指標としては、センサ情報の収集漏れ率と収集遅延を用いる。収集漏れ率は、センサ端末数に対する基地局に到達しなかったセンサ情報数の割合である。また、収集遅延は式 (4) で与えられる。

3.3.2 シミュレーション結果

様々な送信可能時間に対する 1 回の収集進行波あたりの収集漏れ率を図 7 に示す。それぞれの点は、センサ端末の配置の異なる 20000 回のシミュレーションの平均を表している。図に示されるように、収集漏れ率は送信可能時間にしたがって対数軸で直線的に減少する。例えば、要求収集率 R_{app} として 0.9 を達成するためには、送信可能時間をおよそ 3.5 秒に、また要求収集率 0.9999 の場合には送信可能時間をおよそ 12.5 秒に設定すればよいことがわかる。

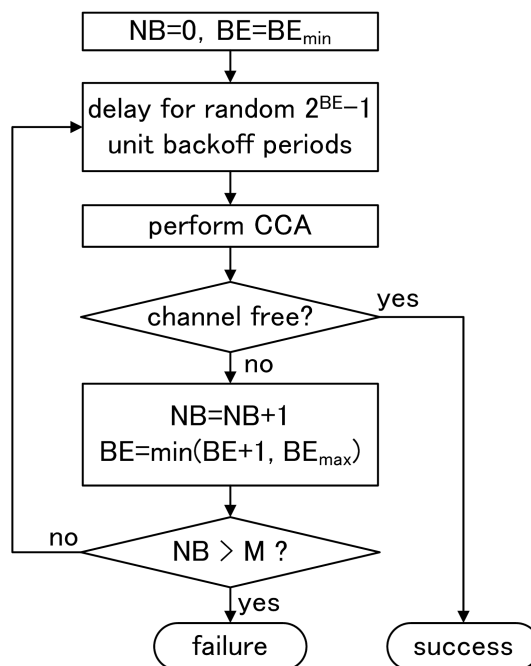


図 6: CSMA/CA の送信フローチャート

表 1: シミュレーションにおけるパラメータ設定

通信速度	100 kbps
パケット長	127 bytes
パケット送信に要する時間	10.16 ms
ACK パケット長	30 bytes
ACK パケット送信に要する時間	2.40 ms
<i>SIFS</i> (short interframe spacing)	0.48 ms
<i>LIFS</i> (long interframe spacing)	2.40 ms
backoff unit	240 ms
$TX_to_RX = RX_to_TX$	0.12 ms
ackWaitTime	2.40 ms
バックオフ指数最小値 BE_{min}	3
バックオフ指数最大値 BE_{max}	5
最大バックオフ回数 M	
センサ情報最大集約数 a	4
オフセット δ	0.2

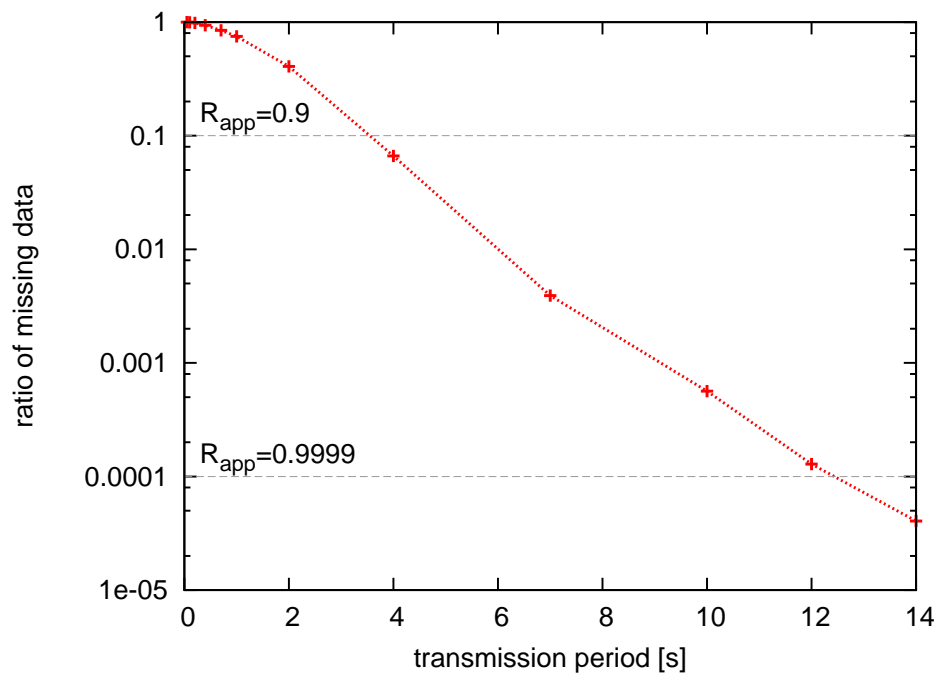


図 7: 1 回の収集進行波における収集漏れ率

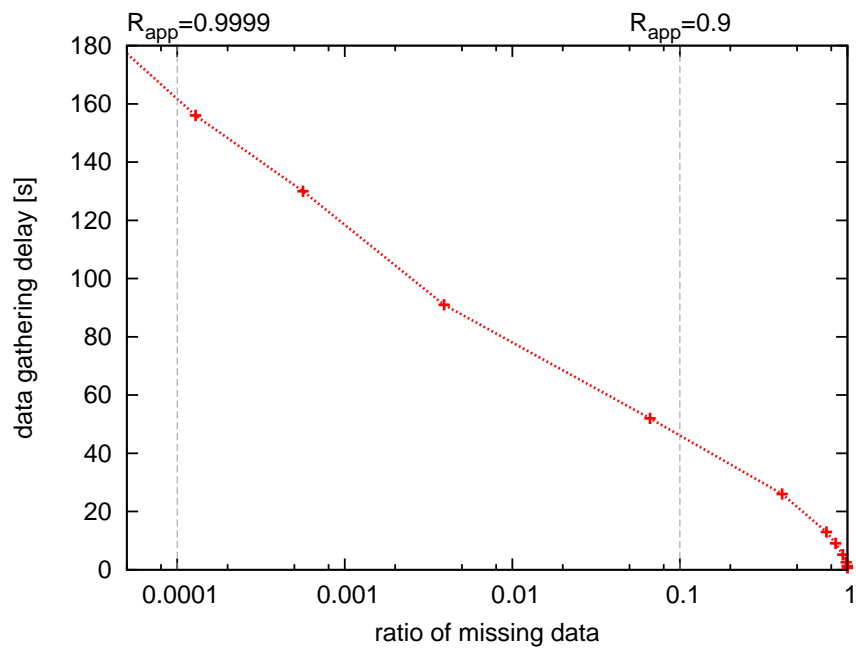


図 8: 1 回の収集進行波における収集漏れ率と収集遅延の関係

図 8 は、収集漏れ率と収集遅延の関係を示したものである。例えば要求収集率 0.9 の場合、収集遅延は約 40 秒であるが、要求収集率 0.9999 の場合には収集遅延は 160 秒と約 4 倍の時間がかかることとなる。この収集遅延は 3 分未満と比較的短いですが、より多くのセンサ端末からなるセンサネットワークでは、最大レベルが大きくなるとともに、密度増加に対してはより大きな送信可能時間によってホップ間のメッセージ転送成功率を向上させる必要があるため、収集遅延がさらに大きくなるものと予想される。そこで次章では、送信可能時間内でメッセージの送信タイミングをランダム化することにより、ホップ間のメッセージ送信成功率を高める手法を提案する。

4 同期型センサ情報収集機構における通信信頼性の向上

前章に示したとおり，同期型センサ情報収集機構では，収集率を向上させるためには送信可能時間 τ を大きく設定せざるを得ず，結果として収集遅延が長くなってしまふ．そこで本章では，送信タイミングを送信可能時間内でランダムに設定することによってホップ間のメッセージ転送成功率を高める手法を提案し，その有効性を評価する．

4.1 送信タイミングのランダム化による通信信頼性の向上

同期型センサ情報収集機構は，レベルが同じセンサ端末間でタイマ位相が同期しているため，メッセージ送信が同時に開始され，通信の衝突やバックオフ回数超過による送信失敗が発生しやすい．そこで，本節では，センサ端末のメッセージ送信のタイミングをランダムに変更することにより，ホップ間のメッセージ転送成功率を高め，より短い送信可能時間で高い収集率を達成する手法を提案する．

4.1.1 送信タイミングのランダム化手法

文献 [6] では，同期型センサ情報収集機構において，同一レベルのセンサ端末間で送信タイミングをランダムにずらす，シンプルながら機能的な衝突回避が行われている．送信タイミングをランダム化すればパケット送信の失敗率が下がり，同じ収集率を得るための送信可能時間を短くすることができるため，収集遅延の抑制につながる．あるいは，同じ送信可能時間を用いた場合の収集率が向上する．具体的には以下のようにしてセンサ端末 S_i の送信タイミング γ_i ($0 \leq \gamma_i < \delta$) をランダム化する．

センサ端末 S_i は，位相 $\phi_i = 1 - \delta$ でアクティブ状態になると，送信タイミング γ_i を $0 \leq \gamma_i < \delta$ の位相区間からランダムに設定する．位相 ϕ_i が γ_i となったときにセンサ端末 S_i はメッセージの送信を開始し，未送信のメッセージすべてを送信し終えるか，もしくは位相 ϕ_i が δ となるまで，IEEE802.15.4 CSMA/CA および ACK に従った再送を行う（図 9）．

4.1.2 シミュレーションモデルと評価指標

シミュレーションモデル，性能指標は 3.3.1 節にしたがう．以降では，送信タイミングのランダム化を行わないものを手法 1 と呼び，図中では synchronize と表記し，送信タイミングのランダム化を行うものを手法 2 と呼び，図中では randomize と表記する．

- 手法 1 送信タイミングのランダム化を行わない手法（synchronize）

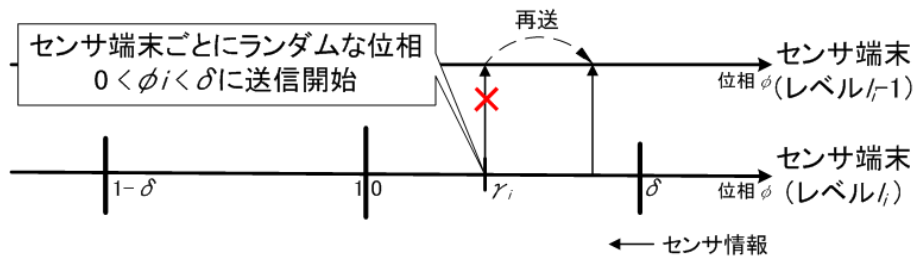


図 9: 送信タイミングのランダム化手法における送信タイミング γ_i

3.1 章で評価した，センサ端末の位相 ϕ_i が 1 となるタイミングで，レベルが等しいセンサ端末がほぼ同期して一斉にメッセージ送信を開始する手法

- 手法 2 送信タイミングのランダム化を行う手法 (randomize)

センサ端末ごとにランダムな送信タイミング γ_i ($0 \leq \gamma_i < \delta$) を逐次設定し，位相 ϕ_i が γ_i となるときにメッセージ送信を開始する手法

4.1.3 シミュレーション結果

手法 1，手法 2 について，送信可能時間に対する収集漏れ率を示したものが図 10 である．なお，図 10 の手法 1 の結果は図 7 と同じものである．図 10 に示されるとおり，予想に反して，送信衝突の軽減を意図して送信タイミングをランダム化した手法 2 が，手法 1 よりも収集漏れ率が高くなっており，情報収集率が悪化している．この原因として，センサ端末の送信タイミングとして 0 に近い位相をたまたま設定したセンサ端末は送信可能時間に近い期間，メッセージの送信，再送を行えるのに対し， δ に近い位相をたまたま設定したセンサ端末は，メッセージの再送および複数メッセージを送信するのに十分な時間を確保できず，送信に失敗していることが考えられる．これに対する解決手法として，さらに手法 3 を提案する．

- 手法 3 送信可能時間の一部でのみ送信タイミングのランダム化を行う手法 (restrict random)

送信タイミング γ_i を $0 \leq \gamma_i < c\delta$ の位相区間からランダムに設定する．ただし， $0 \leq c < 1$ とし，以後 c を送信開始位相区間占有率と呼ぶ．センサ端末の位相 ϕ_i が γ_i となったときにセンサ端末 S_i はメッセージの送信を開始し，未送信のメッセージすべてを送信し終えるか，もしくはセンサ端末の位相 ϕ_i が δ となるまで，IEEE802.15.4 CSMA/CA および ACK に従った再送を行う (図 11)．送信開始位相区間占有率の導入により，送信タイミングによらず再送や複数メッセージ送信のための時間を残すことができる．

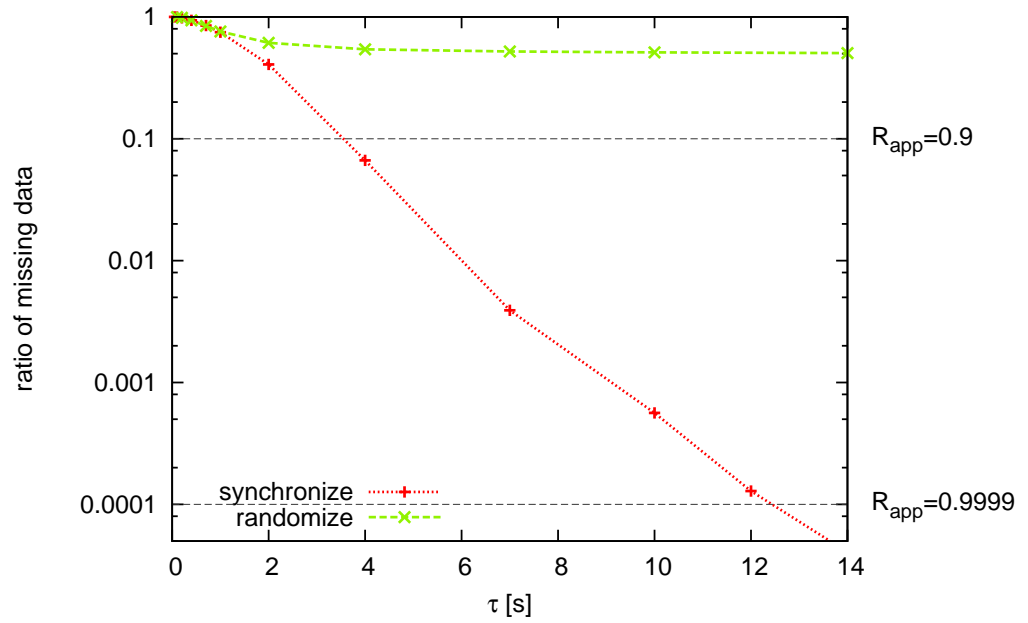


図 10: 1 回の収集進行波における収集漏れ率 (手法 2)

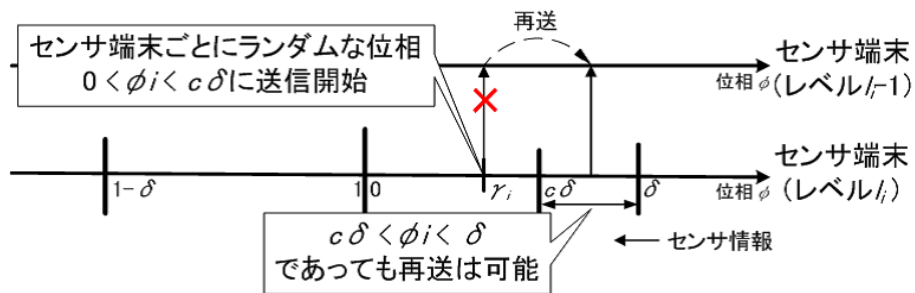


図 11: 送信タイミングのランダム化手法における送信タイミング γ_i (手法 3)

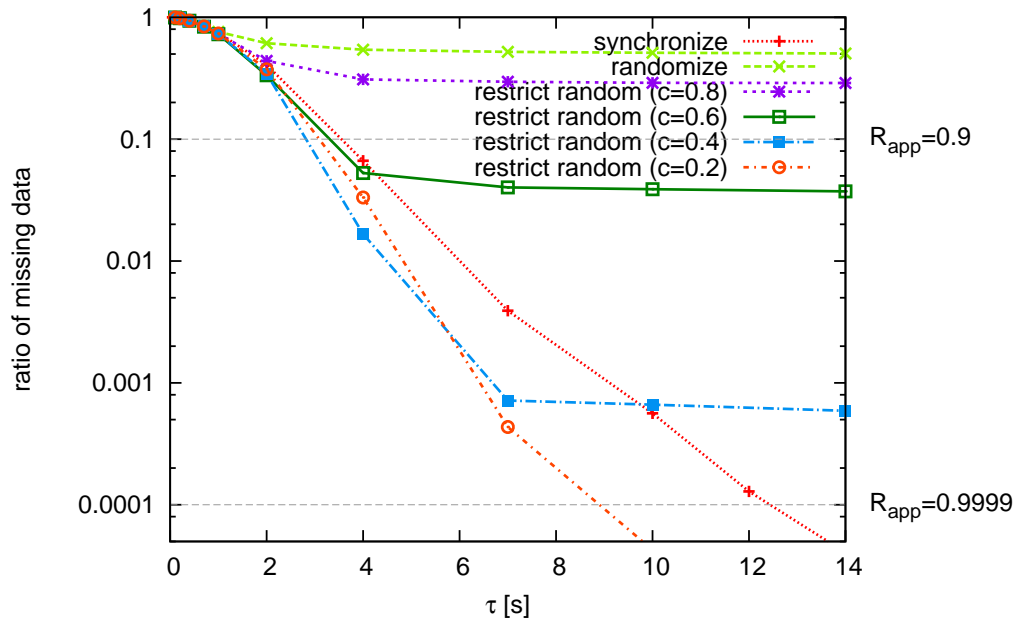


図 12: 1 回の収集進行波における収集漏れ率 (手法 3)

様々な送信開始位相区間占有率について、1 回の収集進行波における収集漏れ率を求めたものが図 12 である。図 12 に示されるとおり、送信開始位相区間占有率を導入することにより、送信可能時間内で送信タイミングをランダム化する手法 2 よりも高収集率が得られる。また、送信開始位相区間占有率が大きくなるにしたがい、手法 2 の性能に近づいている。さらに、送信可能時間が小さい場合には、送信開始位相区間占有率による送信タイミングの制限の効果はそれほど小さくなく、送信開始位相区間占有率による収集漏れ率の大きな違いはない。一方、送信可能時間 τ が比較的大きい場合には、送信開始位相区間占有率を 0.2 とし、いずれのセンサ端末にも十分な再送時間を与えることによって、高い収集率が得られる。

しかしながら、手法 3 では送信可能時間が大きくなるとある程度以上に収集漏れ率が向上しない現象が見られ、また、送信開始位相区間占有率 c が 1 に近づくほど収集漏れ率が収束する送信可能時間が小さくなっている。この原因は次のように考えられる。同期型センサ情報収集機構では、レベルが 1 小さいセンサ端末のメッセージ送信に刺激を受け、そのタイミングに同期して位相が δ になるように PRC によってタイマ位相が調整される。例えば、パルス結合振動子モデルにしたがうと、図 13 のセンサ端末 b は、同期状態においては、レベルが 1 小さい親センサ端末 a が基地局に送信するメッセージを位相 ϕ_b が δ になるとき (図中、時刻 t) に受信しなければならない。ところが、センサ端末 a における送信タイミングのランダム化によって位相 γ_a だけ遅れてセンサ端末 a のメッセージを受信しているため、センサ端末 b のタイマも本来より γ_a だけ遅らされてしまう。そのため、センサ端末 b のタイマ

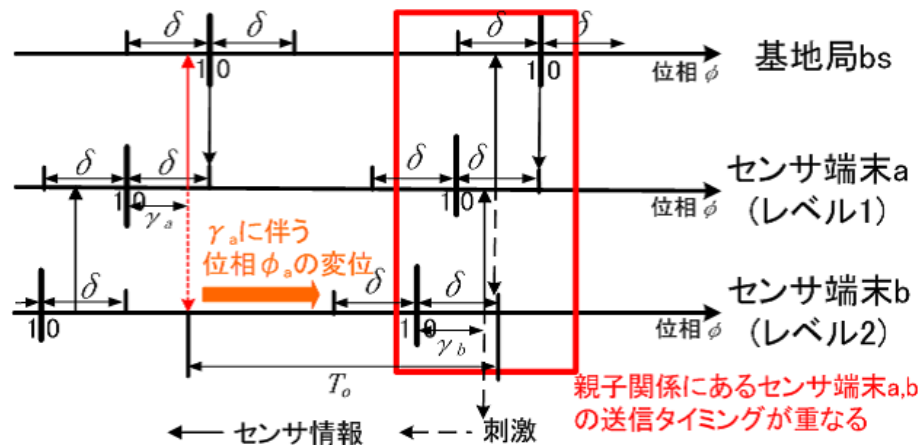


図 13: 送信タイミングのランダム化によるセンサ端末の位相のずれ

位相が 1 になるタイミングも γ_a だけ遅くなり，そこから開始されるセンサ端末 b の送信可能時間は親センサ端末 a の送信可能時間と一部重なり合ってしまうことになる．その結果，メッセージの衝突が起こりやすくなり，ホップごとのメッセージ転送成功率が低下し，収集率が低くなっているものと考えられる．次節では，この問題を解決するための同期位相補正を提案する．

4.2 同期位相補正を用いた送信タイミングのランダム化による通信信頼性の向上

前節で述べた送信タイミングのランダム化に伴う同期のずれを抑えるために，本節では，パルス結合振動子モデルにおける位相の補正手法である Reachback Firefly Algorithm (RFA) を応用する [16] ．

4.2.1 送信タイミングのランダム化における RFA を応用した同期位相補正

パルス結合振動子モデルの一つである Mirollo and Strogatz (M & S) モデル [12] では，本報告で採用しているパルス結合振動子モデルと同様に，振動子の発火は結合関係にある全ての振動子に遅延なく到達し，刺激を与える．そのため，M & S モデルをセンサネットワークにおける時刻同期に応用すると，伝搬遅延や MAC 層におけるバックオフや再送による遅延などによってメッセージの到達遅れが生じ刺激を受けるタイミングが遅くなり，センサ端末間の時刻にずれが生じることが指摘されている [16] ．そこで RFA では，フレームに MAC 層における送信時刻のタイムスタンプを含めて送信し，フレームを受信したセンサ端末ではタイムスタンプにもとづいて時刻同期ずれを補正する [16] ．

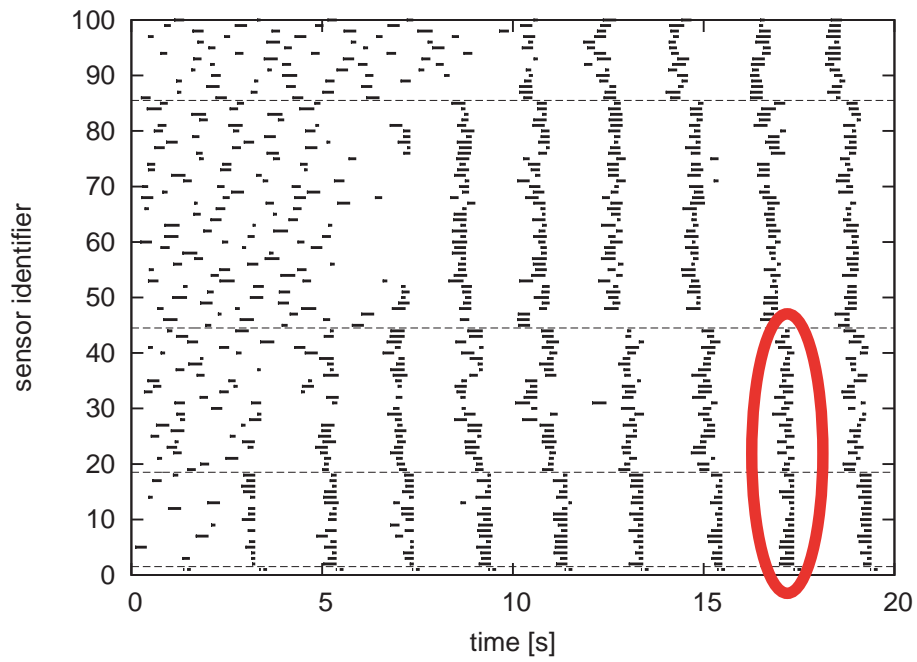
本節では、RFAと同様に、MAC層で送信されるフレームにタイムスタンプを付与することによって同期の補正を行う。具体的には、センサ端末 S_i は、送信するフレームにタイムスタンプ $T_{stamp} = \gamma_i + T_{MAC_i}(\gamma_i)$ を設定する。ここで、 γ_i は送信タイミング ($0 \leq \gamma_i < \delta$) であり、 $T_{MAC_i}(\gamma_i)$ は、MAC層におけるバックオフや再送などによる遅延である。レベルが1大きいセンサ端末 S_j が位相 ϕ_1 でこのフレームを受信したとする。MAC層や送信タイミングのランダム化による遅延がなかった場合、センサ端末 S_j は位相 ϕ_j が $\phi_1 - T_{stamp}$ のときにフレームを受信し、刺激を受けていたはずである。その結果、位相は $\phi_1 - T_{stamp} + \Delta s(\phi_1 - T_{stamp})$ になっていたと考えられる。さらに、刺激を受けたとみなす時刻から T_{stamp} 経過しているので、現在の位相 ϕ_j を、 $\phi_1 + \Delta s(\phi_1 - T_{stamp})$ に設定することにより、送信タイミングのランダム化を行っても同期が維持される。

4.2.2 シミュレーションモデルと評価指標

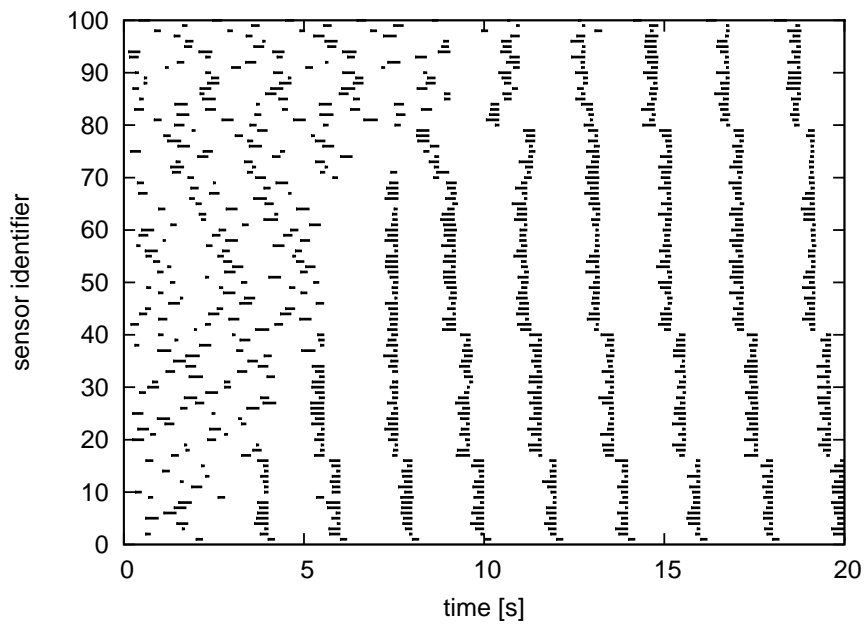
まず、同期位相補正による位相ずれの補正効果を確認するため、少数(100台)のセンサ端末でのシミュレーション評価を行う。その他の条件はこれまでと同様である。具体的には、手法3で送信開始位相区間占有率を0.8と設定した場合について、同期位相補正を適用した場合と、適用しなかった場合のシミュレーションを行い、レベルが1異なるセンサ端末間の同期のずれを比較する。次に、これまでと同様のシミュレーション条件、評価指標で同期位相補正の有効性を評価する。

4.2.3 シミュレーションによる動作確認と評価

図14は、センサ端末の初期位相がランダムで、レベルが十分大きな値の状態から、同期位相補正を行わなかった場合(図14(a))と行った場合(図14(b))で同期が達成、継続される様子を示したものである。 x 軸はシミュレーションの開始を時刻0とした時刻を、 y 軸はセンサ端末の識別子を表している。識別子1は基地局であり、センサ端末は基地局から近いものから順に識別子を割り当てられている。また、破線はレベルの区切りを表しており、破線間のセンサ端末は同じレベルに属している。図では、最大レベルは4である。図14における各線分はセンサ端末において送信を開始する位相 $\phi_i = \gamma_i$ から送信を終える位相 $\phi_i = \delta$ を表している。同期位相補正を行うかどうかによらず、センサ端末の送信タイミングが完全にばらばらな初期状態から、時間の経過とともに、図14(a)ではおよそ10秒、図14(b)ではおよそ13秒の時点で進行波状態が形成されていることがわかる。しかしながら、同期位相補正を行わない場合には、送信タイミングのランダム化による同期ずれによって、丸印で囲ったセンサ端末のように、レベルが1小さいセンサ端末と送信時間の重なりが生じている。一方、同期位相補正を行った場合には、異なるレベル間では送信時間が重なり合ってい



(a) 同期位相補正なし



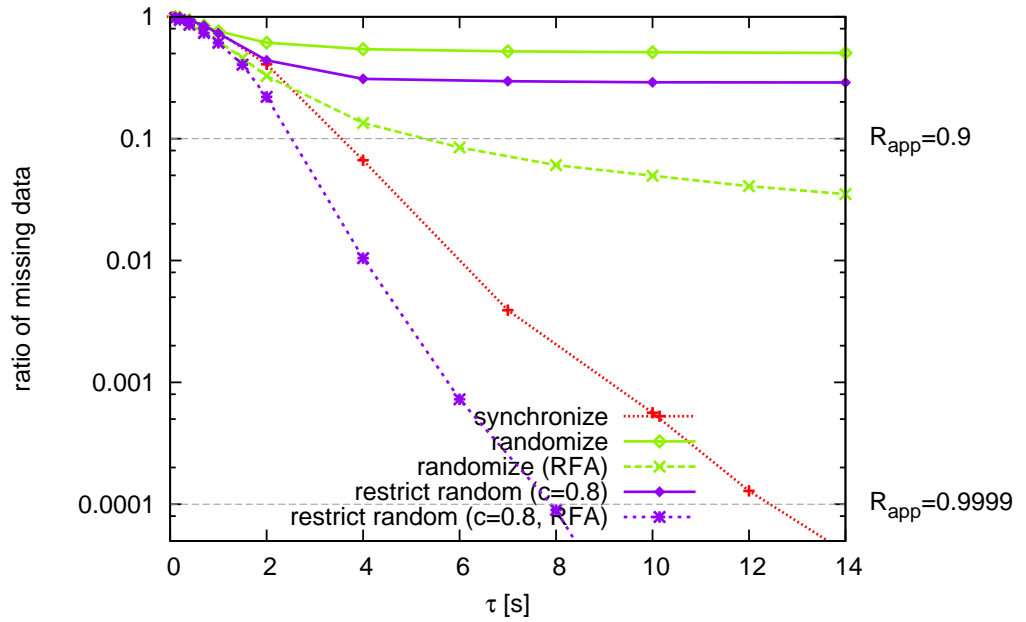
(b) 同期位相補正あり

図 14: 同期位相補正による同期ずれの解消

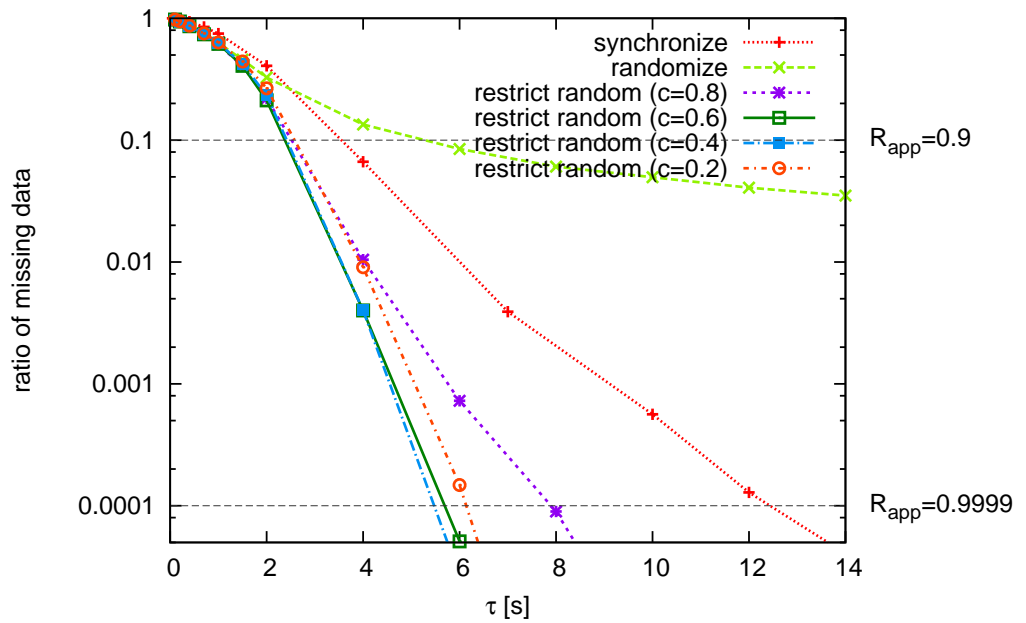
ない。また、同じレベルのセンサ端末間でメッセージ送信開始のタイミングがランダム化されているが、位相が δ となり送信を終了、または中断するタイミングがおよそ一致していることがわかる。したがって、RFA を応用した同期位相補正によって同期ずれが解消されて、適切な同期状態が維持されている。

次に、図 15(a) に、手法 1、手法 2、手法 2 で同期位相補正を行った場合、手法 3 (送信開始位相区間占有率 0.8)、手法 3 (送信開始位相区間占有率 0.8) で同期位相補正を行った場合の、送信可能時間に対する収集漏れ率を示す。図 15(a) より、同期位相補正を用いることにより、収集率が向上していることがわかる。特に、手法 3 における収集漏れ率の改善効果は非常に高い。同期位相補正を行った場合の手法 3 における収集漏れ率を図 15(b) に示す。図 12 と比較して、特に送信開始位相区間占有率が大きく、同期ずれが起きやすい場合に同期位相補正の効果が高いことがわかる。

図 15(b) より、本節のシミュレーション条件では、250 台のセンサ端末からなる最大 13 レベルのセンサネットワークにおいて要求収集率 0.9999 を達成するには送信開始位相区間占有率を 0.4 または 0.6 とし、送信可能時間を 6 秒程度に設定すればいいことがわかる。このときの収集遅延は式 (4) より、72 秒であり、3.3.2 節で得られた収集遅延 160 秒に比べておよそ半分以下と小さくなっている。しかしながら、3.2 節でも述べたように、センサ端末数が増加すると、同じ要求収集率を達成する際の収集遅延は大きくなる。例えば、400 m 四方の領域に 1000 台のセンサ端末をランダム配置した場合のシミュレーション結果を図 17 に示す。最大レベルは 21 であった。要求収集率 0.9999 を達成する送信可能時間は 20 秒であり、収集遅延は 420 秒となり、センサ端末数が 4 倍であるのに対して収集遅延は約 6 倍となっている。



(a) 同期位相補正による 1 回の収集進行波における収集率の改善



(b) 同期位相補正を適用した場合の各手法の 1 回の収集進行波における収集率

図 15: 同期位相補正を適用した場合の 1 回の収集進行波における収集率

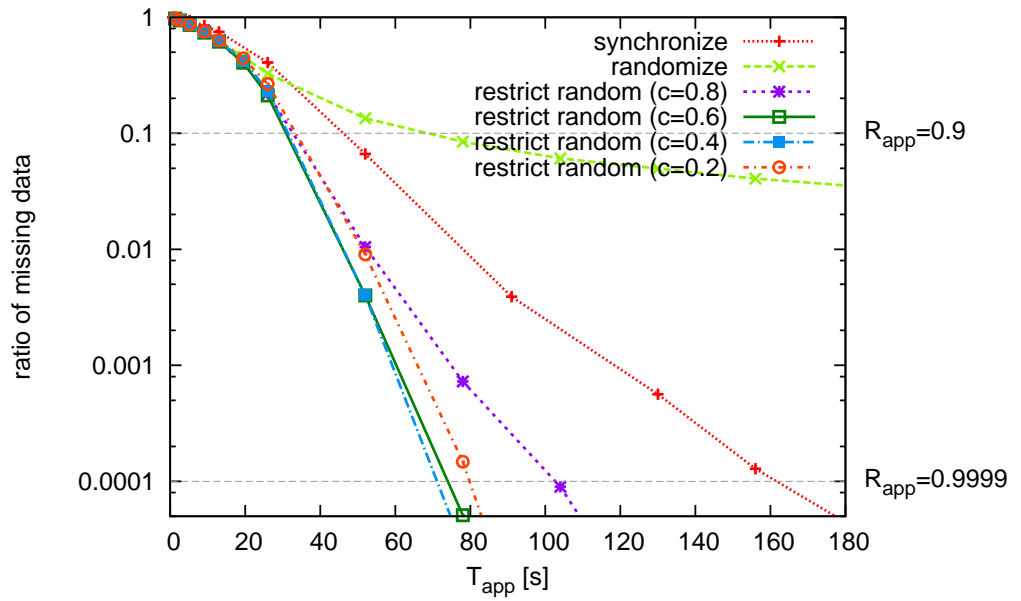


図 16: 同期位相補正を適用した場合の 1 回の収集進行波における収集漏れ率と収集遅延の関係

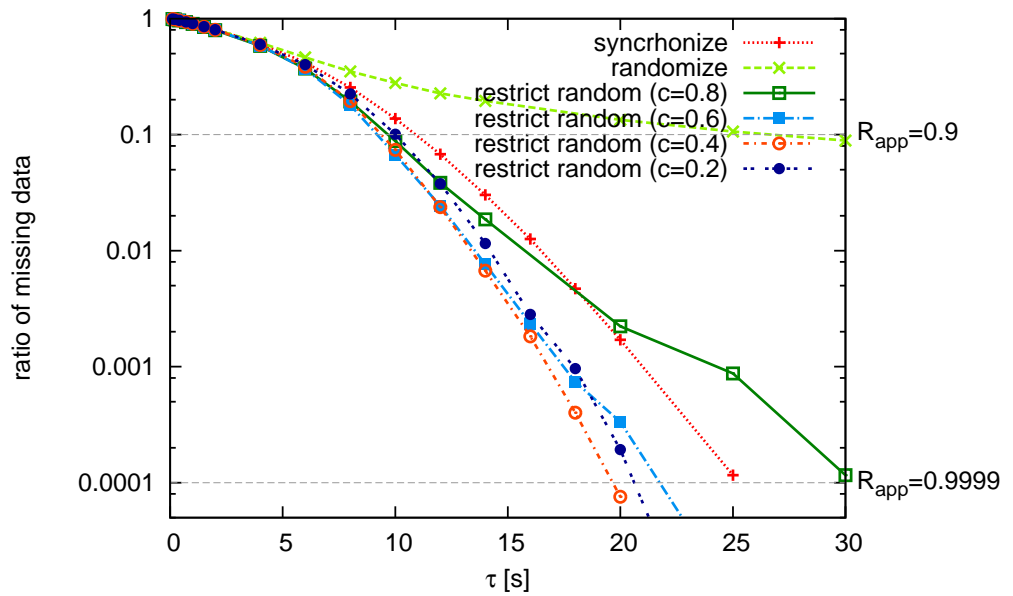


図 17: 同期位相補正を適用した場合の各手法の 1 回の収集進行波における収集率 (センサ端末数 1000 台)

5 複数の収集進行波による高信頼通信機構の提案

同期型センサ情報収集機構では、収集進行波のタイマ周期は情報収集周期と同じに設定され、1回の収集進行波により情報収集を行う。そのため前章で示したとおり、高収集率を達成するためには送信可能時間を大きく設定し、再送回数を増やすことによってホップ間メッセージ転送成功率を高める必要があり、その結果、収集遅延が大きくなる。

そこで本章では、送信可能時間 τ を短くすることによって収集進行波あたりの遅延を小さくするとともに、その結果低下する収集率を複数の収集進行波を繰り返すことによって補完する、低遅延で高収集率な高信頼通信機構を提案する。

5.1 複数の収集進行波による高信頼通信機構の提案

提案手法では、センサ端末は情報収集周期よりも短いタイマ周期で動作する。収集進行波は情報収集周期にあわせたタイミングで生成され、最もレベルの大きいセンサ端末から順に基地局へと順次センサ情報が転送される。その後、タイマ周期に応じて複数回の収集進行波が生成され、それぞれのセンサ端末は、その情報収集周期においてまだ送信が完了していないセンサ情報を、新たに到達した収集進行波上で送信する。したがって、収集進行波が繰り返されるにしたがい、センサ情報を送信するセンサ端末が減少し、メッセージ送信成功率が向上するため、収集進行波あたりのセンサ情報の収集率が向上するものと考えられる。しかしながら、送信可能時間を小さくすることによって収集進行波あたりの遅延を抑えようとすると、収集進行波あたりの収集率が低下するため、結果としてより多くの収集進行波が必要となり、かえって収集遅延が大きくなってしまふ恐れがある。一方、送信可能時間を大きく設定すれば収集進行波あたりの収集率が向上し、より少ない収集進行波で要求収集率を達成できるが、収集進行波あたりの遅延が大きくなる。そこで以降では、送信可能時間、収集進行波数、収集漏れ率、および収集遅延の関係をシミュレーションにより評価する。

5.2 シミュレーションモデルと評価指標

トポロジモデル、MAC、初期状態については3.3.1章と同じものを用いる。

複数の収集進行波による高信頼通信機構の評価では、センサネットワーク全体で同一レベルのセンサ端末の位相同期が定常状態となった後に、センサネットワーク周縁の最もレベルの大きなセンサ端末から基地局に向けた収集進行波をタイマ周期 T_0 に応じて複数発生させる。センサ端末 S_i は位相 ϕ_i が1になると位相を0に初期化するとともに、転送を要するセンサ情報が存在する場合はメッセージ送信を開始する。転送を要するセンサ情報が存在しない場合は送信を行わない。なお、転送を要するセンサ情報とは、過去に子センサ端末から受

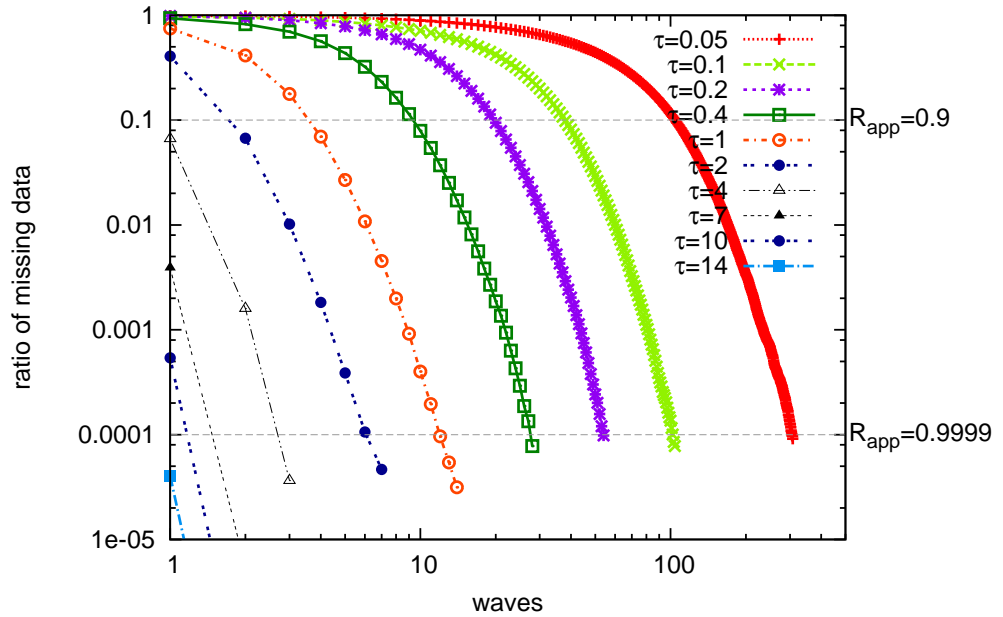


図 18: 複数の収集進行波における収集進行波数ごとの収集漏れ率（手法 1）

信した情報と自身のセンサにより獲得した情報のうち，その情報収集周期において親センサ端末に未送信のセンサ情報を指す．ある収集進行波で送信可能時間内にセンサ情報が送信できなかった場合は，次の収集進行波で送信する．なお，ここではオフセット δ を定数 0.2 とし，タイマ周期 T_o は送信可能時間 τ によって定められるものとする ($T_o = \frac{\tau}{\delta}$) ．

評価指標としては，収集進行波数に対する収集漏れ率，および収集遅延を用いる．収集進行波数に対する収集漏れ率は， w 回目の収集進行波が基地局に達したときの，センサ端末数に対する基地局が未受信のセンサ情報数の割合である．また，収集遅延は，送信可能時間 τ ，タイマ周期 T_o ，収集進行波数 w ，および最大レベル k により，次式で与えられる．

$$T_{app} = k\tau + (w - 1)T_o \quad (5)$$

さらに，要求収集率 0.9999 を満たすときの送信可能時間，収集進行波数，および収集遅延の関係について評価し，要求収集率 0.9999 を満たしつつ，収集遅延を小さくする手法を明らかにする．

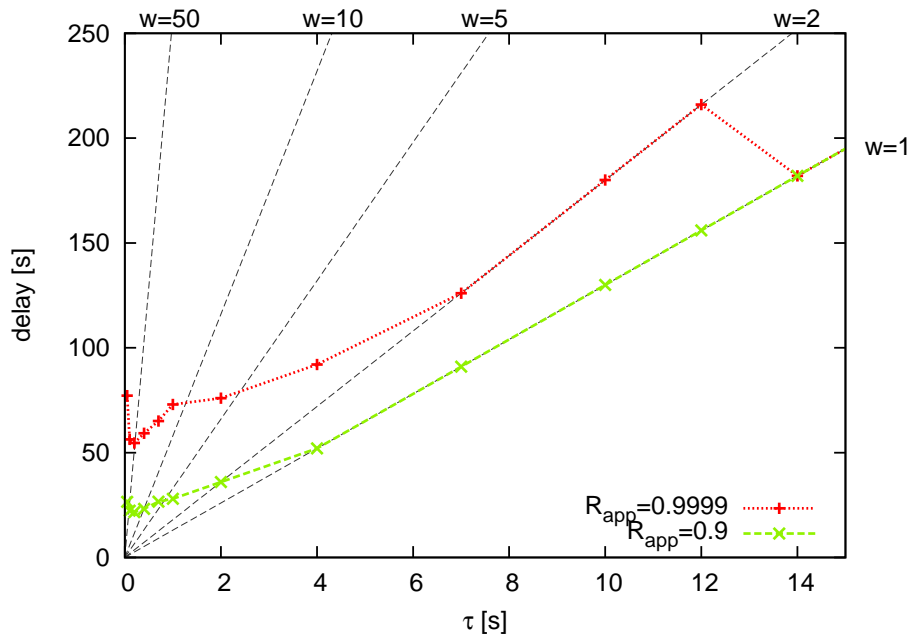


図 19: 複数の収集進行波により要求収集率を満たす収集遅延 (手法 1)

5.3 シミュレーション結果

送信タイミングのランダム化を行わない手法 1 において、さまざまな送信可能時間について、収集進行波数に対して収集漏れ率が低下していく様子を図 18 に示す。例えば要求収集率 0.9999 を達成するために必要な収集進行波数は、送信可能時間が 2 秒では 7 回であるのに対して、0.05 秒では約 300 回となり、送信可能時間が小さくなればなるほど、ある要求収集率を達成するために必要な収集進行波数が非常に多くなることがわかる。また、要求収集率が例えば 0.9 から 0.9999 と高くなった場合、送信可能時間が 0.05 秒に対して必要な収集進行波数が 110 から 300 へ約 2.7 倍に増加し、送信可能時間が 2 秒では 3.5 倍 (2 から 7)、送信可能時間が 4 秒では 2.75 倍 (20 から 55) と、おおよそ近い割合で必要な収集進行波数が増加していることがわかる。

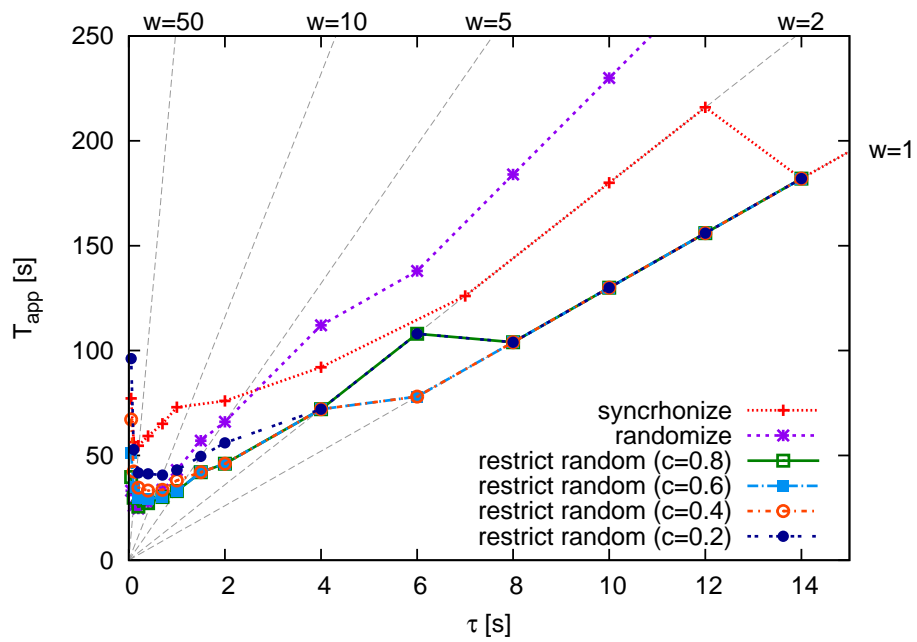
図 18 と式 (5) にもとづき、要求収集率 0.9999 および 0.9 を達成するときの収集遅延を表したものが図 19 である。例えば送信可能時間が 14 秒の場合には 1 回の収集進行波で要求収集率 0.9999 を達成でき、収集遅延が約 152 秒であることを意味する。また、2 回の収集進行波で要求収集率を達成するためには、送信可能時間を 7 秒以上に設定しなければならないことがわかる。図より、送信可能時間が短いほど、ある要求収集率を達成する際の収集遅延が小さく抑えられることがわかる。ただし、送信可能時間が 0.2 秒よりも短くなると、収集遅延がかえって大きくなる。これは、送信可能時間が短すぎるため、バックオフや再送が十

分に行えず、ホップ間のメッセージ転送成功率が低下し、さらに収集進行波あたりの収集率が低下することにより、多くの収集進行波が必要となるためである。

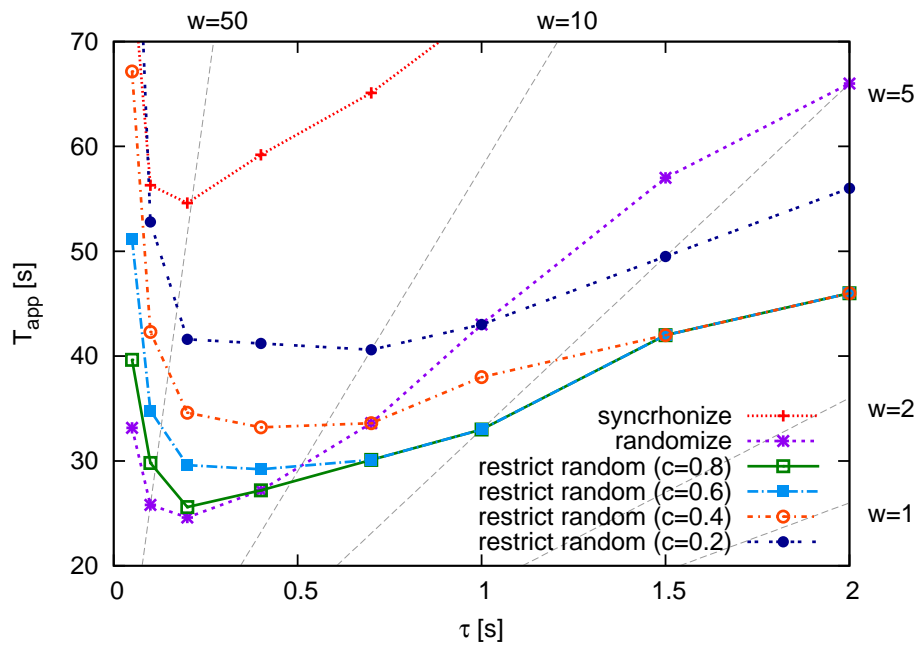
要求収集率 0.9999 の場合の送信可能時間に対する収集遅延の変化の様子を手法 1, 2, 3 についてまとめたものを図 20(a) に示す。図 20(b) は送信可能時間が 2 秒以下の領域を拡大したものである。なお、手法 2 および手法 3 では 4.2 節で提案した同期位相補正を行っている。送信タイミングのランダム化を行うことにより収集進行波あたりの収集率が向上することから、図に示されるように、手法 1 と比較して手法 2, 手法 3 では同じ送信可能時間に対する収集遅延が小さい。また、手法によらず、送信可能時間が 0.2 秒から 0.3 秒のときに収集遅延が最も小さくなる。なお、送信可能時間が短い領域では、送信タイミングを設定する位相区間を制限する手法 3 の収集遅延が手法 2 よりも大きくなっている。これは、手法 3 では、もともと短い送信可能時間においてさらに送信タイミングの設定範囲を制限しているため、かえって通信の衝突が発生しやすくなり、また、再送のための時間も十分に確保できていないことによる。

以上の結果より、センサネットワークにおいて低遅延、高収集率の高信頼性通信を行うためには、送信可能時間を 0.2 秒程度の小さい値に設定し、送信可能時間内で送信タイミングのランダム化を行い、情報収集タイミングあたりに 25 回程度の収集進行波を用いて、センサ情報を収集するのがよいことがわかった。図 20(b) より、このときの収集遅延は 25 秒である。ただし、送信可能時間を 0.2 秒としたときのタイマ周期は 1 秒であり、センサ端末は 1 秒おきに 0.4 秒間アクティブ状態になり、残る 0.6 秒間スリープ状態になるという、短時間での状態遷移を繰り返す。また、センサ端末の子センサ端末からのメッセージ受信待ち期間は 0.2 秒であることから、このような短いタイマ周期での動作には高い精度のタイマ同期が必要となる。例えば現在市販されているセンサ端末のクロック精度は日差 1, 2 秒と言われており、これは 1 秒あたり最大 23 マイクロ秒の誤差が生じることを意味する。同期型センサ情報収集機構では、タイマ周期にしたがってセンサ端末間で定期的に刺激を与えることによってタイマ同期を保っているが、次章で述べるスリープ制御機構を用いた場合、センサ端末は、例えば収集周期 15 分に対して最大 14 分 36 秒にわたって完全にスリープする。この間のクロックのドリフトは最大 19.9 ミリ秒となり、受信待ち時間の 10% のずれが生じる。このずれは、送信タイミングのランダム化による同期ずれと同様の問題を引き起こし、ホップ間のメッセージ転送成功率の低下、さらには収集率の悪化につながると考えられる。

センサ端末数が 1000 の場合の結果を図 21 に示す。図 21(b) より、1000 台のセンサ端末からなるセンサネットワークにおいても同様に、手法 2 で送信可能時間を短く設定し、多くの収集進行波を用いる場合に、最も短時間で要求収集率を達成できることがわかる。ただし、最適な送信可能時間は 0.2 秒と非常に短く、センサ端末数が 250 台の場合よりも、一層、タイマ誤差や通信環境変動の影響を受けやすい。また、収集進行波の間隔も短くなるため、収

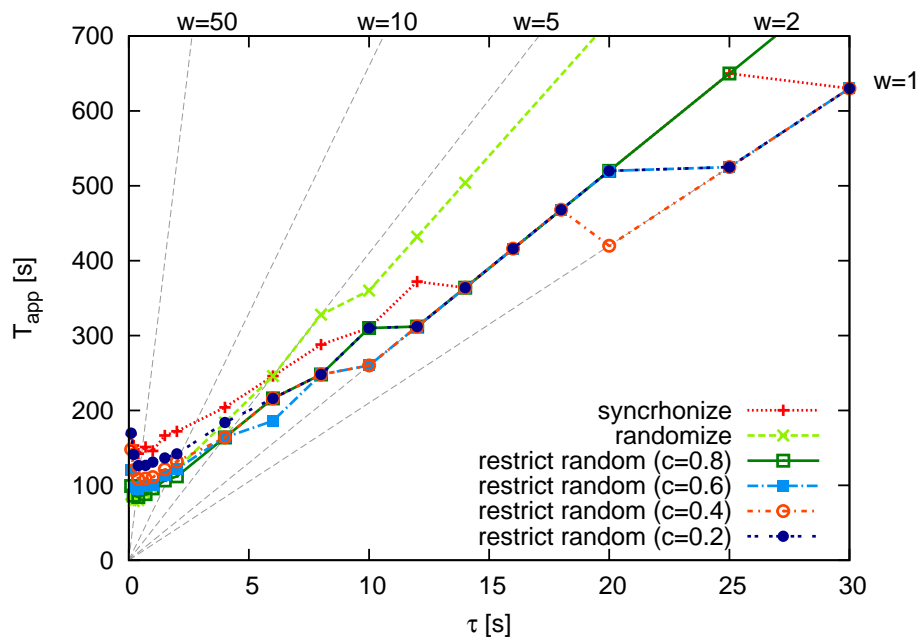


(a) 複数の収集進行波により 0.9999 を達成するための収集遅延

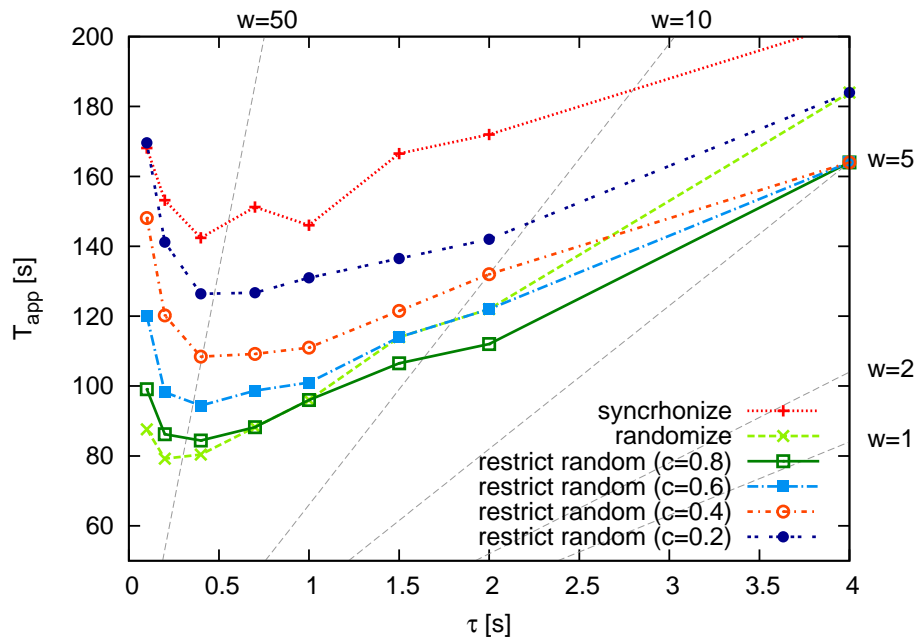


(b) 図 20(a) の拡大図

図 20: 複数の収集進行波により要求収集率 0.9999 を達成するための収集遅延 (センサ端末数 250 台)



(a) 複数の収集進行波により 0.9999 を達成するための収集遅延



(b) 図 21(a) の拡大図

図 21: 複数の収集進行波により要求収集率 0.9999 を達成するための収集遅延 (センサ端末数 1000 台)

集進行波間で電波干渉が生じる恐れがある。したがって、実環境においては、ある程度送信可能時間を大きく設定するのが望ましいと考えられ、また、その場合には、送信開始位相区間占有率が有効な可能性がある。なお、次章では、通信品質変動などによって収集率が低下した場合に、収集進行波数を動的に変更することによって収集率を調整する仕組みを提案している。

6 複数の収集進行波による高信頼通信機構のための自律分散型スリープ制御機構

同期型センサ情報機構では、センサ端末のタイマ周期をアプリケーションが要求する情報収集周期に等しく設定し、情報収集周期にあわせて収集進行波を発生させることで効率的なセンサ情報収集を行う。本報告では、送信可能時間を短く設定して収集進行波あたりの遅延を小さくし、メッセージ送信タイミングのランダム化を行うことによって収集進行波あたりの収集率を向上するとともに、1回の情報収集タイミングに対して複数の収集進行波によって情報収集を行うことにより、高収集率を低遅延で達成する高信頼性通信機構を提案している。

しかしながら、この機構を実現するために、単純に同期型センサ情報収集機構のタイマ周期を収集進行波の発生間隔にあわせて設定すると、情報収集を終えた後の無関係な時間にもセンサ端末が周期的にアクティブ状態とスリープ状態を繰り返すため、電力効率が著しく低下してしまう。例えば、5.2節のシミュレーションモデルで、提案手法により要求収集率0.9999を低遅延で達成するためには送信可能時間を0.2に設定した1秒間隔の収集進行波を25回繰り返すことが必要なため、タイマ周期は1秒に設定される。一方、逐次的な情報収集を行うスマートメータであっても、その情報収集周期はせいぜい15分程度であることから[8]、情報収集周期に相当する900周期のタイマ周期のうち、875周期でのアクティブ時間350秒の電力が無駄に失われてしまう。

そこで、本章では、複数の収集進行波による高信頼通信機構において、効率的なスリープ制御と複数の収集進行波の連続発生を両立させる、自律分散型のスリープ制御機構を提案する。提案するスリープ制御機構では、センサ端末間で情報収集周期と情報収集の開始タイミングを同期させ、また、1回の情報収集タイミングあたりに定められた数の収集進行波を発生させた後は、次の情報収集開始タイミングまでスリープする。図22に提案機構におけるスリープの様子を示す。図では、情報収集周期 T_{cycle} はタイマ周期 w_{cycle} 回に相当し、センサ端末は情報収集開始タイミングから w_{active} 回の収集進行波を発生させて情報収集を行い、残る $w_{cycle} - w_{active}$ 周期はタイマ位相によらずスリープ状態にある。センサネットワーク全体での情報収集周期と情報収集開始タイミングの同期、および収集進行波数の共通化のため、提案機構では、スリープ制御情報と呼ばれる情報を基地局からセンサネットワーク全体に伝播させる。ただし、高信頼性通信機構では基地局へ向けた一方向の通信しか行われなため、スリープ制御情報はホップごとのメッセージ送信に対するMAC層のACKを用いて伝えられる。

以降、本章では、スリープ制御情報の構成、ACKを用いたスリープ制御情報の伝播手法、および情報収集開始タイミングの同期手法、さらにスリープ制御情報をフィードバックとし

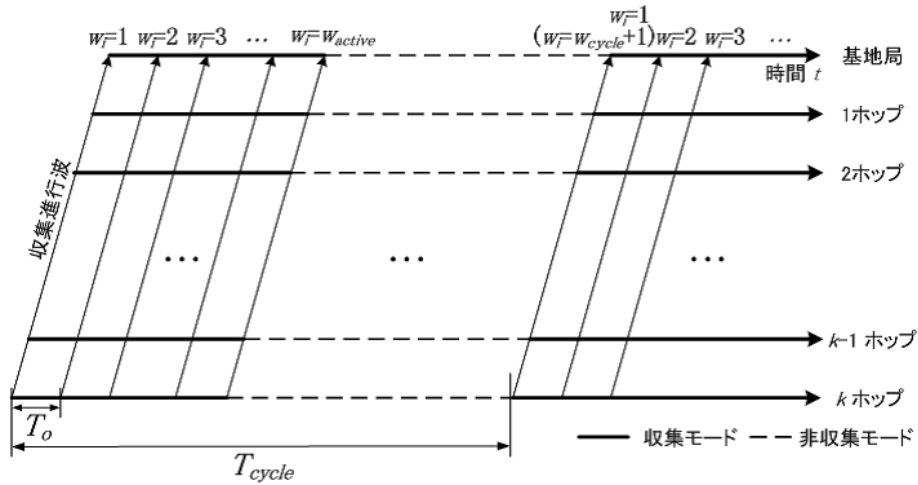


図 22: 複数収集進行波を用いる高信頼通信における自律分散型スリープ制御

て利用した動的な収集率の調整手法について述べ、その有効性をシミュレーションにより評価する。

6.1 スリープ制御情報

センサ端末 S_i はスリープ制御情報として、以下の情報を管理している。

- u_i : 識別番号

スリープ制御情報の新しさを表す識別番号である。識別番号が大きいものほど新しいスリープ制御情報を示す。センサ端末 S_i が受信したもののうち、最も大きい値の識別番号を保持する。

- w_i : 情報収集開始タイミングからのタイマ周期数

センサ端末 S_i のタイマ周期数 w_i は、その情報収集において発生した収集進行波数に相当する。情報収集開始タイミングで $w_i = 1$ とし、センサ端末 S_i がリスニング状態となる時点、つまりタイマ位相 ϕ_i が $1 - \delta$ となるときに値が 1 ずつ増える。

- w_{cycle} : 情報収集周期あたりのタイマ周期数

情報収集周期を T_{cycle} [秒] とする。タイマ周期 T_o [秒] は情報収集周期 T_{cycle} の約数に設定され、情報収集周期あたりのタイマ周期数 w_{cycle} は T_{cycle}/T_o となる。情報収集開始タイミングからのタイマ周期数 w_i が、 $w_{\text{cycle}} + 1$ となるときの次の情報収集を開始するタイミングである。

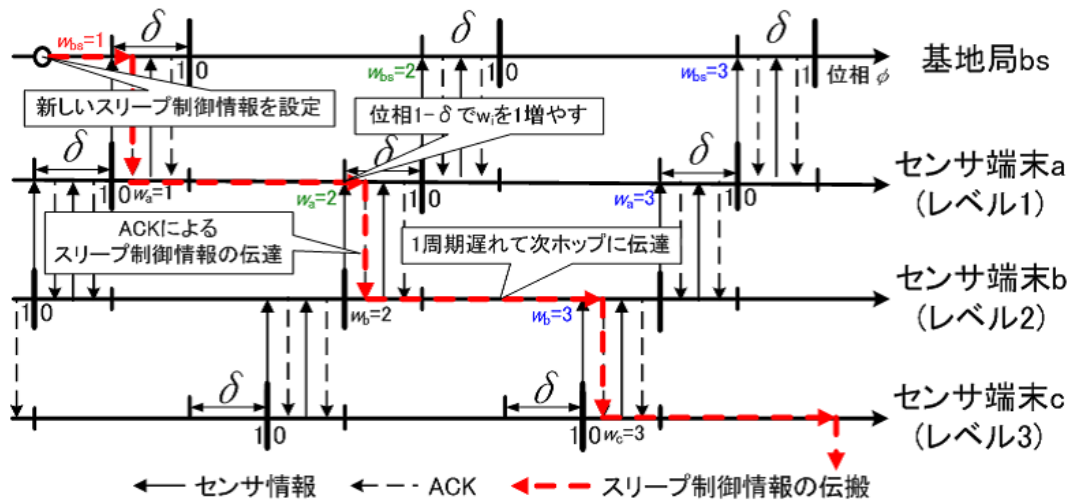


図 23: ACK によるスリープ制御情報伝播例

- w_{active} : 情報収集開始タイミングあたりの収集進行波数

1 回のセンサ情報収集で発生させる収集進行波の数である．センサ端末 S_i は情報収集を開始するタイミングから， $1 \leq w_i \leq w_{active}$ であれば収集モードとなり，タイマ位相にしたがってスリープ状態とアクティブ状態を繰り返し，その後 $w_{active} < w_i < w_{cycle}$ の期間は非収集モードとなり，タイマ位相によらずスリープ状態となる．

なお，初期状態では，全センサ端末のスリープ制御情報は識別子 u_i を 0，現在のタイマ周期数 w_i を 1，タイマ周期数 w_{cycle} および収集進行波数 w_{active} を十分に大きな値とする．

6.2 ACK を用いたスリープ制御情報伝播手法

観測領域に設置された直後は全てのセンサ端末は常にアクティブ状態にあるが，基地局がビーコン信号の送出を開始すると，次第にレベルが適切に設定され，続けて同期が達成された後，タイマ位相に従ったタイマ周期内でのスリープ制御が開始される．基地局は，レベル 1 のセンサ端末からメッセージを受信すると，スリープ制御情報を MAC 層の ACK に含めて送信する（図 23）．基地局は，アプリケーション要求が変化した場合など，必要に応じて情報収集周期や進行波数を設定，変更した新たな識別番号のスリープ制御情報を生成し，これを ACK に含めて送信することにより，任意のタイミングで新たな情報収集を開始する．なお，基地局でもセンサ端末と同じ周期で動作するタイマが管理されており，その動作にもとづいてスリープ制御情報のタイマ周期数 w_{bs} や現在のタイマ周期数 $w_{cycle_{bs}}$ が設定される．

メッセージ送信に対して基地局から ACK を受け取ったレベル1のセンサ端末は、ACKに含まれるスリープ制御情報の識別番号 u_{bs} を自身の管理する識別番号 u_i と比較する。 $u_{bs} \geq u_i$ であれば、自身の管理するスリープ情報を新たなスリープ情報に全て置き換える。これ以降、レベル2のセンサ端末からメッセージを受信した際に送信される ACK には新しいスリープ制御情報が含まれるため、レベル2のセンサ端末も同様の処理によってスリープ制御情報を更新することができる。このようにして ACK によりセンサネットワークの周縁に向けて順次スリープ制御情報が更新されていくが、図 23 に示されるように、ホップ間のスリープ制御情報の転送には1 タイマ周期が必要となる。したがって、センサネットワークの最大レベルが k の場合、 $k - 1$ 回の収集進行波によってセンサネットワーク全体に新しいスリープ制御情報が伝播する。なお、スリープ制御情報により ACK のフレームサイズが数バイト程度大きくなるため、通信の衝突確率が高くなる可能性があるが、新たな制御メッセージを必要とせず、仕組みも単純なため、実現が容易である。

6.3 スリープ制御情報を用いた情報収集開始タイミングの同期

前節で述べたとおり、スリープ制御情報には、現在の情報収集においてすでに何回のタイマ周期が訪れたかを表す情報であるタイマ周期数 w_i が含まれている。したがって、同じレベルのセンサ端末間でスリープ制御情報の受信タイミングが異なっても、タイマ周期数を等しく設定することができ、情報収集周期や情報収集開始タイミングを同期させることができる。例えば図 24 において、時刻 t にセンサ端末 S_k は識別番号 5 の新しい情報収集に参加しており、その子センサ端末 S_i, S_j は識別番号 4 の古い情報収集に参加している。時刻 t において親センサ端末 S_k へのメッセージ送信が成功したセンサ端末 S_i は、新しいスリープ制御情報を含む ACK を受信することによって、新しい情報収集に参加する。このとき、古い情報収集でのタイマ周期数 w_i は 8 であったが、スリープ制御情報の更新により親センサ端末と同じタイマ周期数である 3 になり、同期が達成される。センサ端末 S_j はこの収集進行波での送信可能時間内のメッセージ送信が失敗したため、ACK を受信せず、スリープ制御情報が更新されないが、タイマ周期 T_0 秒後に訪れる次の収集進行波でメッセージ送信に成功し、ACK を受信することによって、スリープ制御情報が更新されている。このとき、タイマ周期数 w_j は 4 となり、同じレベルのセンサ端末 S_i のタイマ周期とも一致しており、情報収集周期や情報収集開始タイミングの同期が確立されている。

本報告で対象とするアプリケーションシステムでは、用途に応じてセンサ情報の収集周期や要求収集率が定められる。図 18 に示されるように、複数の収集進行波による収集率は収集進行波数が増えるほど高くなる。一方、収集進行波数が不必要に多いとセンサ端末は余分の電力を消費し、センサネットワークの寿命が短くなってしまう。したがって、消費電力の

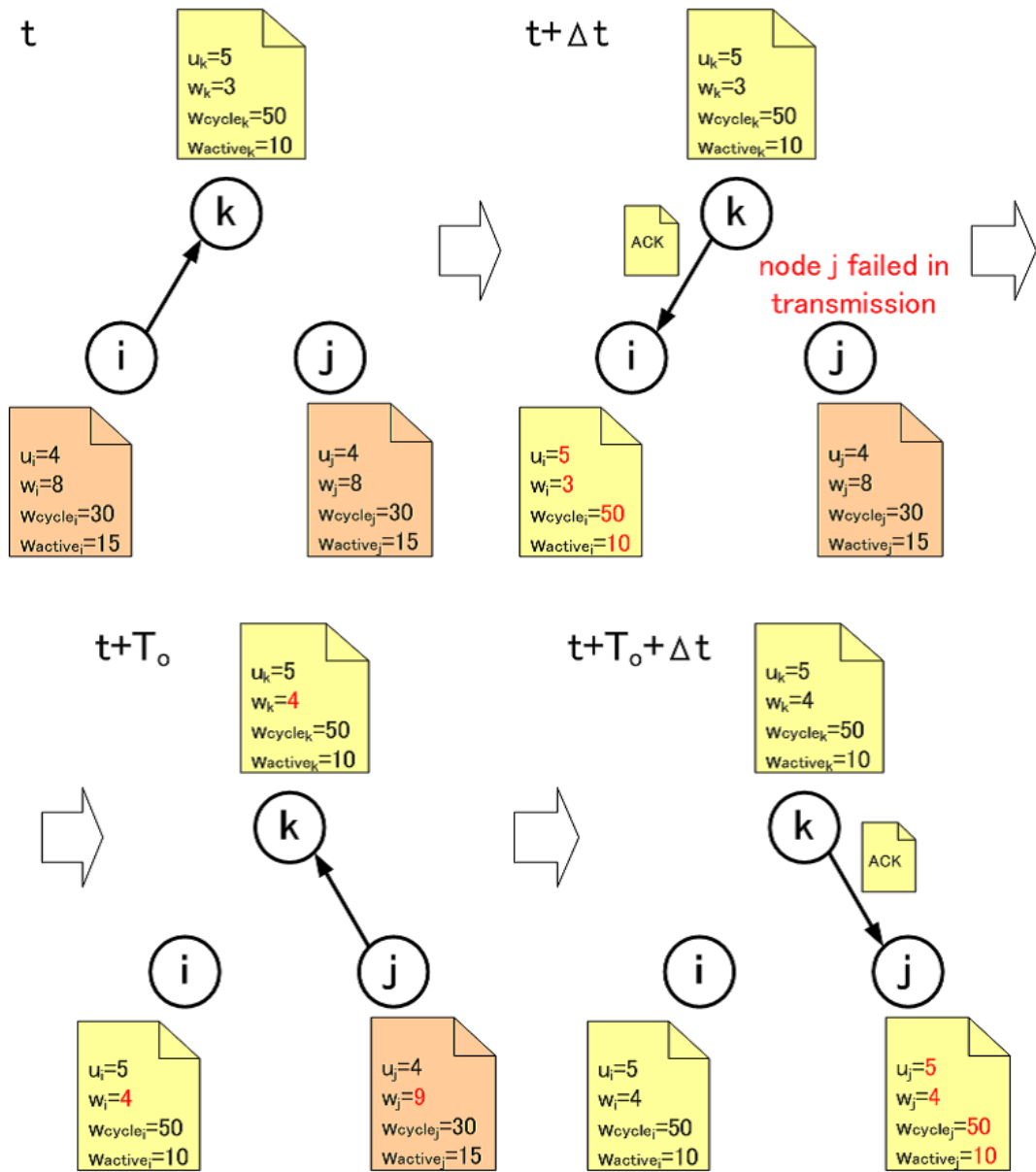


図 24: ACK によるスリープ制御情報の伝達

観点からは、要求収集率を得るための収集進行波数を適切に設定する必要がある。しかしながら、収集進行波あたりの収集率はホップ間のメッセージ転送成功率に依存し、ホップ間のメッセージ転送成功率は、送信可能時間や送信開始タイミングのばらつき、同じセンサ端末を親とするセンサ端末数、電波干渉範囲にあるセンサ端末数、さらには無線通信環境の変動に影響を受ける。そのため、要求収集率を満たすように収集進行波数 w_{active} をあらかじめ設定したとしても、実際の収集率は時間とともに変動する。提案機構では、送信する ACK のスリープ制御情報を変更することにより、基地局は、動的に情報収集周期や情報収集タイミングあたりの収集進行波数を変更することができるため、受信したセンサ情報の収集率に応じて収集進行波数を適宜変更することによって、電力効率と収集率のバランスを保つことができる。

6.4 シミュレーションモデルと評価指標

本節ではまず、提案スリープ制御機構で適切なスリープ制御が行われていることを確認するため、少数（100台）のセンサ端末を用いたシミュレーション評価を行う。なお、センサ端末のタイマ周期 T_o を2秒とする。一つ目のシミュレーションでは、初期状態を時刻0とし、センサネットワーク全体で同期が確立された後の時刻20秒に、識別番号 u_{bs} を1、現在のタイマ周期数 w_{bs} を0、情報収集周期あたりのタイマ周波数 w_{cycle} を10、収集進行波数 w_{active} を3と設定したスリープ制御情報をACKに付与して送信する。なお、このときの情報収集周期 T_{cycle} は $T_o \times w_{cycle} = 20$ 秒である。二つ目のシミュレーションでは、さらに、時刻80秒において、新たに、識別番号 u_{bs} を2、現在のタイマ周期数 w_{bs} を0、情報収集周期あたりのタイマ周波数 w_{cycle} を8、収集進行波数 w_{active} を5と設定したスリープ制御情報をACKに付与して送信する。これにより、情報収集周期が20秒から16秒に変更される。

さらに、複数の収集進行波を用いた情報収集において、提案するスリープ制御機構による電力消費効率の評価を、提案するスリープ制御機構を用いる場合と、用いない場合とのアクティブ比により示す。ここで、アクティブ比とは、情報収集周期に対する、情報収集周期内でセンサ端末あたりのアクティブ状態にある時間の総和の比を表す。スマートメータによる情報収集周期を参考に情報収集周期 T_{cycle} を15分とし[8]、5章において要求収集率0.9999を、最小の収集遅延で達成した手法2（送信可能時間0.2秒，オフセット0.2）について評価を行う。なお、情報収集周期 T_{cycle} [秒]，要求収集率 R_{app} を達成するために要する収集進行波数を w ，送信可能時間を τ とすると，1回の収集進行波あたりでアクティブ状態となる時間は図3より 2τ [秒] であることから，アクティブ比は以下の式で求められる。

$$\frac{2\tau w}{T_{cycle}} \quad (6)$$

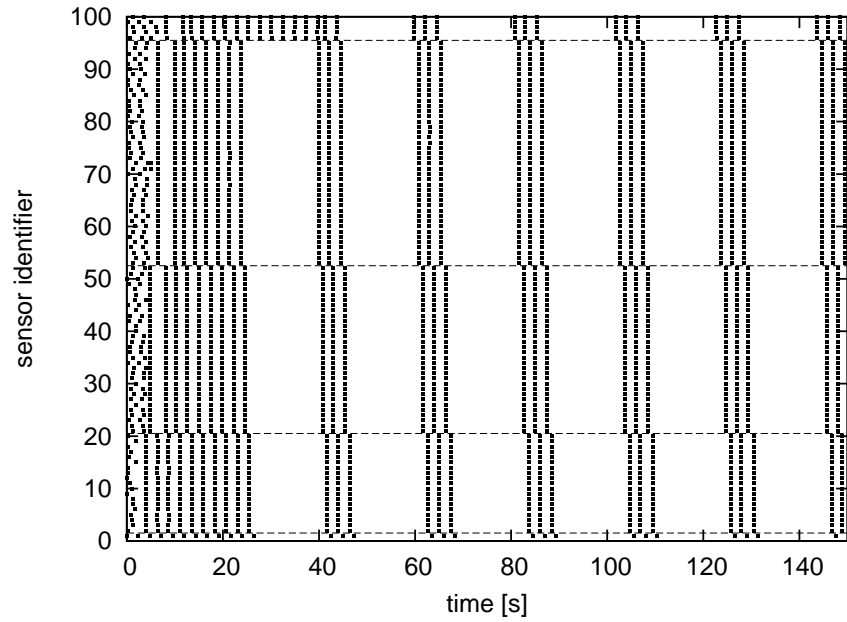
一方，提案するスリープ制御機構を用いない場合は，センサ端末は常に同期型センサ情報収集機構にしたがったスリープ制御を行うため，情報収集周期や，要求収集率によらず，常にそのアクティブ比は $2\delta = 0.4$ である．

6.5 シミュレーション結果

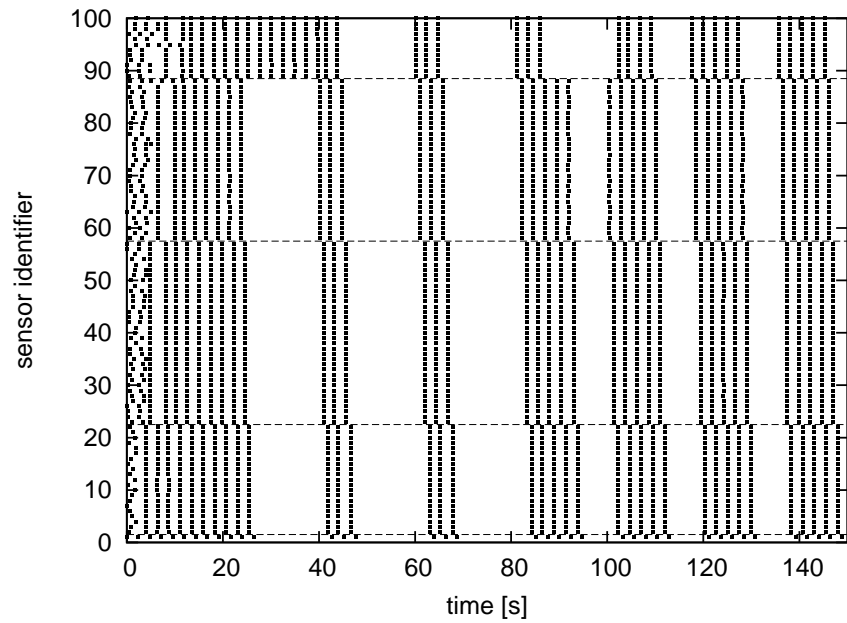
まず，提案するスリープ制御機構の動作確認のため，図 25 に，センサ端末 S_i が収集状態，かつ位相 ϕ_i が 1 となる時刻を表す．

一つ目のシミュレーションの結果を表す図 25(a) では，時刻 20 秒で基地局からスリープ制御情報が送信された後，3 回の収集進行波によってレベル 3 のセンサ端末までスリープ制御情報が到達している．このスリープ制御情報で指定された収集進行波 w_{active} は 3 であり，スリープ制御情報が送信されてから 3 回の収集進行波が発生したことから，レベル 1 からレベル 3 のセンサ端末は，その後 $w_{cycle} - w_{active} = 7$ 周期の間，非収集モードになっている．その結果，レベル 4 のセンサ端末にはスリープ制御情報が伝達されず，タイマ周期にしたがってアクティブ状態を繰り返している．レベル 1 からレベル 3 のセンサ端末が 2 回目の情報収集のために収集モードになると，レベル 4 のセンサ端末にも ACK によってスリープ制御情報が伝達されるため，以降は，センサネットワーク全体で同じ収集周期，収集タイミング，収集進行波数のセンサ情報収集が行われている．さらに，二つ目のシミュレーションでは時刻 80 秒で新たなスリープ制御情報が送信されているが，図 25(b) に示されるように，この場合にもスリープ制御情報は順次センサネットワーク全体に伝播し，時刻 115 秒以降では，新しい収集周期，収集タイミング，収集進行波数のセンサ情報収集が行われている．これらの結果から，本章で提案したスリープ制御機構により，適切なスリープ制御とタイミング同期が実現されていることが示された．

続いて，複数の収集進行波を用いた情報収集において，スリープ制御機構による電力消費効率の評価を行う．要求収集率が高くなるにつれて，必要な収集進行波数が増加するため，式 (6) より，図 26 で示されるとおり，アクティブ比が大きくなる．しかしながら，スリープ制御機構を用いない場合と比べると，アクティブ比が最大 70 分の 1 になり，電力効率が大きく向上することがわかる．なお，提案スリープ制御機構のアクティブ比は式 (6) で示されるとおり，情報収集周期に対してタイマ周期と収集進行波数が，あるいは収集遅延が小さいほど，電力効率が高くなる．



(a) 初期状態からの情報収集周期，タイミング，収集進行波数の設定



(b) 情報収集周期，タイミング，収集進行波数の変更

図 25: スリープ制御機構による情報収集周期，タイミング，収集進行波数の設定の様子

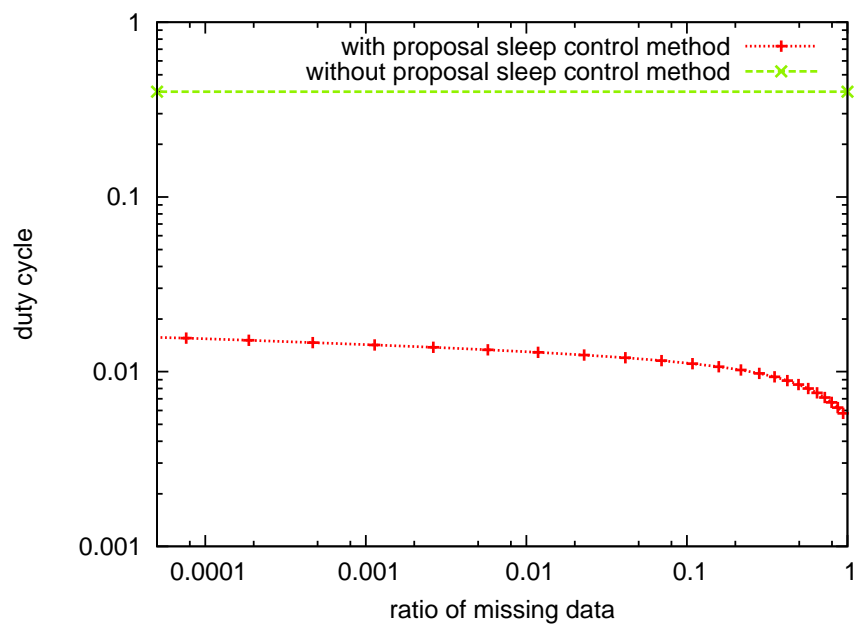


図 26: スリープ制御機構におけるアクティブ比

7 おわりに

本報告では，長期間運用のための省電力性，拡張性，適応性，耐故障性，自律分散の要求に加え，定期的な全センサ端末からのセンサ情報の収集において，低遅延かつ高収集率を要求するアプリケーションシステムに適した，高信頼通信機構の提案を行い，シミュレーション評価を行った．まず，我々のグループが提案する同期型センサ情報収集機構における通信信頼性が十分でないことを示し，同期型センサ情報収集機構上で送信タイミングのランダム化を行う手法を提案した．しかしながら，送信タイミングのランダム化により，同期ずれが生じ，送信タイミングのランダム化を行わない場合よりも通信信頼性が低下することが示された．この問題に対して，RFA を応用した同期位相補正を行い，要求収集率 0.9999 を達成するときの収集遅延を約 160 秒から約 70 秒に削減した．さらに，センサ端末数の増加などによる収集遅延の増加に対処するため，同期型センサ情報収集機構を拡張することにより，1 回の情報収集に対して複数の収集進行波を発生させる高信頼通信機構を提案した．その結果，1000 台のセンサ端末からなるセンサネットワークにおいて要求収集率 0.9999 を達成するときの遅延を約 420 秒から約 80 秒へと短縮した．さらに，複数の収集進行波を用いる場合の効率的なスリープ制御機構を提案し，アクティブ比を 70 分の 1 に低減した．

謝辞

報告を終えるにあたり，御指導，御教授をいただきました大阪大学大学院情報科学研究科の村田正幸教授に深く感謝いたします．また，本報告において直接御指導いただきました大阪大学大学院情報科学研究科の若宮直紀准教授には，様々な相談に乗っていただき，懇切丁寧な御指導とともに，多くの助言をいただきました．心よりお礼を申し上げます．また，平素から適切なお助言をいただいた大阪大学大学院情報科学研究科の荒川伸一助教にも深く感謝いたします．最後に，本報告のために多くの時間を割いて相談に乗っていただき，支えていただいた村田研究室の皆様方に心からお礼申し上げます．

参考文献

- [1] T. Arampatzis, J. Lygeros, and S. Manesis, “A survey of applications of wireless sensors and wireless sensor networks,” in *Proceedings of the 13th Mediterranean Conference on Control and Automation*, pp. 719–724, June 2005.
- [2] I. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, “Wireless sensor networks: a survey,” *Computer Networks (Elsevier) journal*, vol. 38, pp. 393–422, Mar. 2002.
- [3] N. Wakamiya and M. Murata, “Synchronization-based data gathering scheme for sensor networks,” *IEICE Transactions on Communications*, vol. E88-B, pp. 873–881, Mar. 2005.
- [4] Y. Taniguchi, N. Wakamiya, and M. Murata, “A traveling wave based communication mechanism for wireless sensor networks,” *Journal of Networks*, vol. 2, pp. 24–32, Sept. 2007.
- [5] S. Kashihara, N. Wakamiya, and M. Murata, “Implementation and evaluation of a synchronization-based data gathering scheme for sensor networks,” in *Proceedings of IEEE International Conference on Communications, Wireless Networking (ICC 2005)*, vol. 105, pp. 19–24, May 2005.
- [6] 谷口 義明, 若宮 直紀, 村田 正幸, “センサネットワークのための進行波現象を利用した通信機構の実装と評価,” 電子情報通信学会技術研究報告書 (NS2007-40), vol. 107, pp. 1–6, Sept. 2007.
- [7] 榎原 俊太郎, 若宮 直紀, 村田 正幸, “建造物内に構築されたセンサネットワークにおける同期型センサ情報収集機構の設計および実装と評価,” 電子情報通信学会技術研究報告書 (IN2005-159), vol. 105, pp. 19–24, May 2006.
- [8] I. B. C. Services, “供給と環境保全に向けた欧米の事例紹介-スマートメーター・スマートグリッド-,” available at <http://www.meti.go.jp/committee/materials/downloadfiles/g71101c04j.pdf>, Nov. 2007.
- [9] ユビキタスセンサーネットワーク技術に関する調査研究会, “ユビキタスセンサーネットワークの実現に向けて,” available at http://www.soumu.go.jp/s-news/2004/040806_4_b2.html, July 2007.

- [10] I. F. Akyildiz, T. Melodia, and K. R. Chowdhury, "A survey on wireless multimedia sensor networks," *Computer Networks*, vol. 51, no. 4, pp. 921–960, 2007.
- [11] J. N. Al-Karaki and A. E. Kamal, "Routing techniques in wireless sensor networks: a survey," in *Proceedings of IEEE International Conference on Communications, Wireless Networking*, vol. 11, pp. 6–28, Dec. 2004.
- [12] R. E. Mirollo and S. H. Strogatz, "Synchronization of pulse-coupled biological oscillators," *Journal on Applied Mathematics*, vol. 50, pp. 1645–1662, Dec. 1990.
- [13] P. Goel and B. Ermentrout, "Synchrony, stability, and firing patterns in pulse-coupled oscillators," *Physica D*, pp. 191–216, Mar. 2002.
- [14] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks," in *Proceedings of Wireless Communication and Networking Conference*, pp. 3005–3014, Jan. 2000.
- [15] IEEE Std. 802.15.4 - 2003, "Standard for telecommunications and information exchange between systems - local area metropolitan area networks - specific requirements - wireless medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications for low rate wireless personal area networks (wpan)."
- [16] G. Werner-Allen, G. Tewari, A. Patel, M. Welsh, and R. Nagpal, "Firefly-inspired sensor network synchronicity with realistic radio effects," in *Proceedings of the 3rd ACM International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys '05)*, pp. 142–153, Jan. 2005.