光無線システムのための応答検知に基づく適応型 メディアアクセス方式

正 員 中 村 眞 (シャープ(株) 技術本部 システム開発センター)
非会員 佐 藤 康 二 (シャープ(株) 技術本部 システム開発センター)
非会員 江 指 正 洋 (シャープ(株) 技術本部 システム開発センター)
非会員 宇 野 裕 史 (シャープ(株) 技術本部 システム開発センター)
非会員 藤 井 章 博 (宮城大学 事業構想学部 デザイン 情報学科)
非会員 根 元 義 章 (東北大学 大学院 情報科学研究科)

Response-Detection based Adaptive Medium Access Control Scheme for Optical Wireless Systems

Makoto Nakamura, Member, Koji Sato, Non-member, Masahiro Esashi, Non-member, Hiroshi Uno, Non-member (System Technology Development Center, Sharp Corporation), Akihiro Fujii, Non-member (School of Project Design, Miyagi University), Yoshiaki Nemoto, Non-member (Graduate School of Information Science, Tohoku University)

An optical wireless communication system may be disturbed by the interference caused by the signal transmitted from the other communication system, when several optical wireless communication systems exist in the same physical space. In this treatise, a framework that avoids communication disturbance of the optical signal interference, achieved by having each communication system to adjustively change the communication initiation timing, is proposed. This mechanism will then implement a medium access control scheme that allows several communication systems to co-exist in the same physical space.

キーワード：光無線システム, 干渉, 共存

1. はじめに

近年の光無線通信用デバイスの性能向上は著しく、10m程度の範囲において 100kbps オーダの通信を可能にする小型で軽量かつ安価なデバイスが実用化されている。このようなデバイスの普及に伴って、パーソナルコンピュータの入力装置をコードレス接続したい、という要求が高まっている。

パーソナルコンピュータと入力装置を接続するための無線通信システムに対しては、以下の項目が要求される。

- (1) コンピュータに複数の入力装置が接続できること (1 対 n 通信)
- (2) 入力装置からの入力データが一定時間内にコンピュータに伝達されること (リアルタイム性の保証)
- (3) 複数のコンピュータが隣接して同時稼働する場合においても、混信による通信性能の劣化が少ないこと (複数システムの同時利用)

上記 (1),(2) の要求事項を満足する通信方式の一例とし

ては、コンピュータが制御局となって複数の入力装置 (端末局) のメディアアクセスタイミングを制御する方式、いわゆる TDMA (Time Division Multiple Access) 方式がある。ただし TDMA 方式の導入だけでは (3) の要求事項が解決できないため、制御局間で通信を行なうことなく、分散制御により複数システムを共存させるためのメディアアクセス方式を実現することが課題となる。

携帯電話などの移動体端末通信では、制御局と端末局間は TDMA 方式を使用し、隣接する制御局毎に異なるキャリア周波数を用いることにより、この課題を解決している。しかしながらこの方式では、与えられた周波数帯域を複数の帯域に分割して利用するため、全帯域をそのまま利用する場合と比較して通信データ速度が低下するというデメリットがある⁽¹⁾。

一方、光無線通信には以下の特徴が挙げられる。

- 光信号強度は光源からの距離の 2 乗に半比例して減衰する、光は指向性をもつ、光は障害物によって遮断される、という物理的性質がある。

図1 光無線システムメディアアクセス動作

Fig. 1. Medium access behavior of underlying optical wireless system

- 制御局からの通信可能範囲（ゾーンの大きさ）を限定できる（例えば指向方向で10m程度）。

このため、空間的な隔たりがあれば2つのシステムは互いに影響を及ぼさない、すなわち複数システムの同時利用が可能になる。

従って、全ての制御局で同一キャリア周波数を用いたとき、混信が起これるのは空間的に接近して設置されているシステム間でのみに限定される。すなわち、複数システムの同時利用を実現するという課題は、いくつかのシステムで発生している局所的な混信をいかに低減させるか、という問題に帰着する。

そこで本論文では、TDMA方式を用いた光無線システムにおいて混信による通信性能劣化を低減させるための一手法として、パケット受信誤りに関する統計情報を基にTDMAのタイミング制御を行なうメディアアクセス方式を提案する。

第2章では、TDMA方式を用いた光無線システムのメディアアクセス動作を明確にし、第3章で混信を低減させるためのメディアアクセスアルゴリズムを提案する。第4章ではシミュレーションを用いて本アルゴリズムを評価した結果について述べる。

2. 光無線システムメディアアクセス方式

図1に本提案方式の前提となるTDMA方式を用いた1対n光無線システムのメディアアクセス動作例を示す。制御局はシステム内の通信対象となる端末局へ制御パケット (poll packet) を伝送することにより、その端末局に対する伝送許可を与えるものとする。伝送許可を受けた端末局はその制御局より伝送された制御パケット受信に引き続き、伝送すべきデータを有している場合には規定時間内に制御局に対し応答パケット (response packet) を伝送する。この制御パケット及び応答パケットにより制御局と端末局との間の一回のデータ転送シーケンスを完了する。制御局は一定期間 (フレーム期間) 内にシステム内の各端末局に対するデータ転送シーケンスを順に実行すると共にフレーム期間

図2 混信発生時メディアアクセス動作

Fig. 2. Medium access behavior with interference on multiple systems

図3 フレーム期間開始タイミング遅延に基づくメディアアクセス動作

Fig. 3. Medium access behavior with interference avoidance on multiple systems

を周期とした各端末局との間の通信を保証する⁽²⁾。

図2に混信発生時における各光無線システムのメディアアクセス動作例を示す。光無線システム S_a , S_b の局が互いに他のシステムから発せられる光信号の影響を受ける範囲内に位置している場合、各システム内で伝送された制御・応答パケットが他のシステムのトラフィックに影響を及ぼすことでその影響を受けたパケットが受信誤りとして検知される、あるいは伝送されたパケットそのものが検知されない可能性がある。このとき各システムにおいて、フレーム期間中における制御局と端末局との間の通信が一時的にあるいは継続的に阻害される期間が存在することになる。

この混信による通信障害に継続的に陥ることを回避するために、現象として現れるパケット受信誤りを検知し、その上でシステム内部におけるフレーム期間の開始タイミングを遅延させることで各システムが自律的に調整を図る方式が考えられる。

図3にフレーム期間開始タイミング遅延に基づく理想的なメディアアクセス動作例を示す。各光無線システムがパケット受信誤り検知に基づきフレーム期間の開始タイミングを遅延させることで各システムがTDMA制御を相互の通信に影響のない期間に遷移させることができれば混信による影響を取り除くことができる。

この方式の実現に関する一つの課題は、制御局が応答パケット受信誤りを明確に検知できる場合を除き、パケットそのものが検出できなかった場合にそれが混信による影響によるものか、あるいは伝送すべきパケットが本来存在しないことによるものなのかを識別できない点にある。制御局の制御パケットに対しその対象となる端末局が常に応答パケットを返す規定を設けることはその識別のための手段の一つではあるものの、本来制御局に対し伝送するデータがない場合にも余計なパケット応答が課せられるため電力消費の面で非効率であり、特に電力消費の面で制約のある小型のバッテリー駆動機器（例えばコードレスマウス）などに対する適合性に欠ける。

一方、パケット受信誤り検知と共に規定時間内における応答パケット受信がないこと（パケット無応答）を判断することでその情報をフレーム期間の開始タイミング調整に反映させようとした場合には、本来送信すべきデータがない状態でもパケット無応答と同一視されてしまうことにより、特にそのシステムに対して効果的でないフレーム期間の開始タイミング遅延が行われてしまう場合が考えられる。加えてこのフレーム期間開始タイミング変更の結果、それまで複数のシステムが問題なく稼働していた場合においても新たに混信が発生し通信障害を引き起こす可能性がある。

3. 提案方式

〈3・1〉 アルゴリズム 本節において、上記点を加味した提案メディアアクセス方式を説明する。

図4に本方式のアルゴリズムを示す。

1対n光無線システムの制御局はフレーム期間毎に各端末局に対するTDMA制御を行う。制御局は一定フレーム期間中にその通信対象となる各端末局からの応答パケットを受信する。ただしその応答パケットが受信誤りとして検知された場合、制御局はそれをパケット受信誤り回数として一定フレーム期間の間カウントする。また一定フレーム期間中、制御局は通信対象となる端末局へ制御パケット送信後、規定時間内に応答パケットが検知されなかった場合にはそれをパケット無応答回数としてカウントする。制御局は通信対象となる端末局に対する制御パケット送信期間、及び通信対象となる端末局からの応答パケット受信期間を除く期間には他システム内にて送受信される任意の通信パケット（他システムパケット）を受信可能であるとする。上記期間内に制御局が他システムパケットを検知した場合にはそれを他システムパケット検知回数として一定フレーム期間の間カウントする。

制御局は一定期間毎にフレーム期間の開始タイミング遅延を行うか否かを判断する（フレームタイミング遅延判断フェーズ）。その際、一定期間内におけるパケット受信誤り回数とパケット無応答回数を合わせたものがその期間内において端末局へ対し伝送許可を与える全ての制御パケットの数に対して占める割合を算出する。それが規定上限値（UPPER_BOUND）を上回った場合、制御局は他のシステムと

```
When a response packet error detected:
    errorcounter_increment;

When a response packet is not detected:
    noresponsecounter_increment;

When any other packet from other systems detected:
    othersystempackets_increment;

Judgement-phase:
    if (delayed_mode == TRUE)
        if ((errorcounter + noresponsecounter) /
            totalpollpackets > UPPER_BOUND)
            delayed_mode = TRUE;
        else
            if ((errorcounter + noresponsecounter) /
                totalpollpackets <= LOWER_BOUND)
                delayed_mode = FALSE;

    if (errorcounter == 0 && noresponsecounter != 0 &&
        othersystempackets > OTHER_ACTIVE)
        if (random_value > NO_DELAY)
            delayed_mode = FALSE;

counter_initialize;

if (delayed_mode == TRUE)
    delay_control;

end;
```

図4 提案アルゴリズム

Fig.4. Algorithms of proposed scheme

の間の混信による通信障害が発生していると判断し、次のフレーム期間の開始タイミングを規定範囲内の時間分遅延させる。

一旦遅延制御を行った後には上記の割合が規定下限値（LOWER_BOUND）を下回るまでその状態を維持し（delayed_mode）、以降のフレームタイミング遅延判断フェーズにおいてそれを反映させる。

また、制御局は一定期間内においてパケット受信誤りが検知されず、かつパケット応答がなく、かつ他システムのパケット検知回数から他の通信システムが動作していると想定できる規定値（OTHER_ACTIVE）を超えている場合には、フレーム期間の開始タイミング遅延を停止する。これは自らのシステムに対する変更のメリットが少ない状況であると同時に、フレーム期間の開始タイミング遅延が他システムの通信に対し影響を及ぼす可能性が高いと判断できる状況であることによる。ただし、上記条件に合致する状況が他システムとの間の混信によって観測される可能性も皆無ではないため、乱数値を算出しそれが規定値（NO_DELAY: 相対的に低い値に設定）を超える場合にフレーム期間の開始タイミング遅延を行わないようにする。

この手続きを一定期間毎に繰り返すことにより、各システムが混信による影響を取り除くべく適応的にフレーム期

表1 システム変数
Table 1. System parameters

共存システム数	3
システム毎の端末局数	2
試行回数	500
最大世代数	1000
フレーム期間	13.8ms/1 frame
制御パケット期間	640 us
応答パケット期間	1.1 ms
制御-応答パケット GAP 期間	213 us
応答-制御パケット GAP 期間	133 us
評価サイクル	5 frame
UPPER_BOUND	25
LOWER_BOUND	5
OTHER_ACTIVE	10
NO_DELAY	0.2
フレーム期間開始タイミング遅延時間	[0-12]ms
伝送速度	75kbps

間の開始タイミングの調整を行うように機能させる。またその効果として同一空間内において複数システムの同時利用を可能にする。

4. シミュレーション

〈4・1〉 モデル 本方式のアルゴリズムの有効性を示すための計算機シミュレーションを行った。

同一空間内に3つの光無線システムが共存する環境を設定する。表1にシステム変数を示す(基本的な変数の値はIrDA Control Specification 記載の数値⁽²⁾に従う)。

各光無線システムは制御局と2つの端末局が従属する3局によって構成され、独立して動作する。このとき各システムは他の2システム内の局から発せられるパケットによる混信の影響を互いに受ける範囲に存在するものとする。各システムの構成は3システム共に同じとする。

各システムにおける制御局は独立してそれぞれの端末局との間での伝送手順を実行すると同時に、パケット検知手順においてフレーム期間内における応答パケットの検知手続きを行い、応答パケット受信状況をチェックする。このパケット検知手順で得られる情報を適宜更新しながら一定期間(評価サイクル)毎にその得られた情報を用い、フレーム期間開始タイミングの遅延を行うかどうかを決定し、それに基づくタイミング遅延を行う。フレーム期間開始タイミング遅延時には表1記載のフレーム期間開始タイミング遅延時間を満たす任意の整数が選択され、適用される。

なお、3システムのパケット処理時間の総和が確実に単一フレーム期間内に納まるように、通信パラメータ及びシステム定数を設定する(この場合1フレーム期間の89%に相当)。

パケット検知手順におけるルールは以下の通りである。

- (1) 同一タイミングにおいて異なるシステムのパケット送信期間の一部が相互にオーバーラップするとき、それぞれのパケットは混信の影響を受けるものとする。
- (2) 応答パケットが混信の影響を受けた場合、そのパ

ケットは受信誤りパケットとして制御局に検知されるものとする。

- (3) 制御局からの制御パケットが混信の影響を受けた場合、そのパケット自体は無効なパケットとなり、端末局はその制御パケットに対する応答パケットを返さない。ただし、制御局は送信した制御パケットが受信誤りパケットになったかどうかを判断できないため、それを端末局からのパケット無応答として判断する。

以降においてはある時点におけるシステムの挙動を記述するために世代(generation)を用いる。1世代は1フレーム期間を単位とした離散時間概念であり、各システムに対する操作は1世代毎に実行される。

最大世代数はシステム動作上の上限値であり、この値を超えるまで期間、各システムはそれぞれ独立に通信制御手順を実行する。試行回数は上記手順の繰り返し回数を規定する。

〈4・2〉 評価基準 世代 g におけるシステム s のパケット廃棄率 P_d を以下のように定義する。

$$P_d(s,g) = \frac{ERP(s,g) + NRP(s,g)}{TP(s,g)} \dots\dots\dots (1)$$

$ERP(s,g)$:世代 g におけるシステム s のパケット受信誤り回数

$NRP(s,g)$:世代 g におけるシステム s のパケット無応答数

$TP(s,g)$:世代 g におけるシステム s の端末局へ対し伝送許可を与える全ての制御パケット数

パケット廃棄率は各システムにおけるフレームタイミング遅延判断フェーズにて算出され、その値を元にフレーム期間の開始タイミング遅延制御の有無が決定される。

複数からなるシステム全体に関する指標として、世代 g における同一空間内の全てのシステムの集合 S によって決定される全システムパケット廃棄率 P_{td} を以下のように定義する。

$$P_{td}(S,g) = \frac{\sum_{s \in S} (ERP(s,g) + NRP(s,g))}{\sum_{s \in S} TP(s,g)} \dots\dots\dots (2)$$

このとき、世代 g における全システム稼働率 P_{sa} は式(2)を用いて以下のように定義され、 $P_{sa} = 1$ のときはシステム全体としてのパフォーマンスが完備であることを示す。

$$P_{sa}(S,g) = 1 - P_{td}(S,g) \dots\dots\dots (3)$$

なお、以降において、 $P_{sa} = 1$ となる世代に至るまでの時間を収束時間とする。

〈4・3〉 結果 フレーム期間開始タイミングの遅延制御に関し、二種類の方式を適用した。

一つはフレーム期間開始タイミングを遅延させる決定が行われた後、実際の制御の際に表1記載のフレーム期間開

図5 パケット廃棄率 (方式1)
Fig. 5. Packet dropping rate with method 1

図8 パケット廃棄率 (方式2)
Fig. 8. Packet dropping rate with method 2

図6 全パケット廃棄率 (方式1)
Fig. 6. Total packet dropping rate with method 1

図9 全パケット廃棄率 (方式2)
Fig. 9. Total packet dropping rate with method 2

図7 収束時間分布 (方式1)
Fig. 7. Distribution of convergence time with method 1

図10 収束時間分布 (方式2)
Fig. 10. Distribution of convergence time with method 2

始タイミング遅延時間を満たす整数値を一様乱数を用いて選択し、その値を用いてタイミング調整を行う方式である (方式1)。他方はフレーム処理開始後のパケット無応答あるいは受信誤り検知までの時間を計測し、それがフレーム期間に占める相対的な位置からウェイトを算出することにより、そのウェイトを加味して遅延量を決定する方式である (エラーパケット検知までの時間が短いほど遅延量が大きくなるように選択確率を設定する、方式2)。

図5、図6に方式1を用いたある試行におけるパケット廃棄率、及び全パケット廃棄率を示す。

システムの挙動を観察するために、収束までに長期間を要した試行を選択した (図5はそれぞれのシステム毎に算出されたパケット廃棄率をそのまま積み重ねてプロットしている。図8も同様)。

この試行においては255世代目にて全システム稼働率 $P_{sa} = 1$ となり、収束することが確認される (収束時間は約3.5秒)。通信開始初期において極端に高い通信障害が発

生したものの 10 世代目近傍においてそれがある低い水準まで低減する。以降収束までの間のパケット廃棄率は大きく変動する傾向があり、その傾向にはシステム毎に差があることが確認できる。またシステム全体としての通信効率率は収束するまでの間は高くないことが図 6 から確認できる。

図 7 に方式 1 の収束時間分布を示す。試行回数を増やすことでより平均値に近づくという統計的性質から、図 7 では 500 回の試行による収束時間分布を示す。このときの平均収束時間は 109.1 世代 (1.5 秒) である。ただしその半分以上は 75 世代 (1.1 秒) までに収束し、早期に干渉による障害回避が図られることがわかる。

図 8、図 9 に方式 2 を用いたある試行におけるパケット廃棄率、及び全パケット廃棄率を示す (収束時間は 245 世代で約 3.4 秒)。

図 8 においては図 5 と同様の傾向がみられるものの、世代間における各システム毎のパケット廃棄率の変動幅は図 5 に比較して小さく、方式 1 に比べて安定した挙動を示すことがわかる。更に、図 9 において全パケット廃棄率の世代における推移水準は図 7 に比べて低く抑えられており、システム全体としての通信効率も高いことがわかる。

図 10 に方式 2 を用いた 500 回の試行に基づく収束時間分布を示す。平均収束時間は 98.1 世代 (約 1.35 秒) であり、少ない世代数での収束傾向は図 7 と比べて大差ないが、収束までに要する世代数が大きくなる試行が図 7 においては散発的にみられるのに対し、図 10 では殆ど確認できない。方式 2 は収束特性の面でも高い効果があることが確認できる。

なお、本シミュレーションでは 3 システム内の局全てが混信の影響範囲内にあるという前提で行っているが、現実的には光無線通信の特徴からあらゆる光無線システムが相互に影響を及ぼす状況の発生は限定的である。通常他システムの存在が検知されない状況では相互のシステムは空間的に分離されているとみなすことができ、この場合は通信への影響は皆無である。また端末局からの応答パケットが常にあるとは限らないことから、相互に影響範囲内にある他システムの存在が常に通信を阻害するということには必ずしも至らず、その場合も通信への影響を無視できる。本方式は上記状況をも含めてパケット受信に関する統計情報から通信への影響が無視できない局所的な混信が発生したと判断できる場合にそれらを動的に回避するための包括的な手段を与えることができる。

5. 結 論

本論文では、TDMA 方式を用いた光無線システムにおいて混信による通信性能劣化を低減させるための一手法として、それぞれの光無線システムがパケット受信誤りに関する統計情報を基に TDMA 方式に基づくタイミング制御を行なうメディアアクセス方式を提案し、その効果に関する検証を行った。

今後は複数の光無線システムが存在する環境下において、

新たな機器接続・切断などによるトポロジーの変化に追従すると共に、要求される QoS(Quality of Service) に従い通信の最適化を可能とする柔軟性の高いメディアアクセス方式の実現が課題である。

(平成 11 年 6 月 4 日受付, 同 11 年 10 月 1 日再受付)

文 献

- (1) 進士昌明 編「移動通信」丸善株式会社, 1989
- (2) IrDA Control Specification (Formerly IrBus) - Final Revision 1.0, June 30, 1998

中 村 眞 (正員) 1981 年甲南大学理学部生物学科卒。1983

年大阪大学大学院基礎工学研究科生物工学専攻修士課程了。同大学院博士課程の後, 1987 年シャープ (株) 入社。現在シャープ勤務ならびに東北大学大学院情報科学研究科博士課程在学中。携帯型計算機端末, 移動体通信システム, 分散処理等の研究に従事。情報処理学会, 電子情報通信学会各会員。

佐 藤 康 二 (非会員) 1994 年筑波大学大学院経営・政策科学

研究科修士課程了。同年シャープ (株) 入社。現在赤外線通信技術研究開発に従事。情報処理学会会員。

江 指 正 洋 (非会員) 1987 年京都大学大学院工学研究科情

報工学専攻修士課程了。同年シャープ (株) 入社。現在赤外線通信技術研究開発に従事。情報処理学会会員。

宇 野 裕 史 (非会員) 1986 年大阪大学大学院工学研究科電

子工学専攻修士課程了。1997 年同大学院工学研究科情報システム工学専攻博士課程了。1986 年シャープ (株) 入社。現在赤外線通信技術研究開発と標準化活動に従事。IEEE, 電子情報通信学会各会員。工博。

藤 井 章 博（非会員） 1987 年東北大学工学部通信工学科卒。

1992 年同大大学院博士課程単位取得退学。同年同大応用情報学研究センター助手。同大大学院情報科学研究科を経て、現在宮城大学事業構想学部助教授。情報ネットワーク、並列・分散処理の研究に従事。IEEE、情報処理学会、ソフトウェア科学会、電子情報通信学会各会員。工博。

根 元 義 章（非会員） 1968 年東北大学工学部通信工学科卒。

1973 年同大大学院博士課程了。工博。同年同大助手，1984 年同大電気通信研究所助教授を経て，1991 年同大大型計算機センター教授。現在同大大学院情報科学研究科教授。マイクロ波伝送路回路，衛星利用ネットワーク，情報伝送システムなどの研究に従事。1981 年 IEEE-MTT-Micro Wave Prize 受賞。IEEE、情報処理学会、電子情報通信学会各会員。