

周波数ホッピングを用いた 近距離無線通信方式の他局間干渉低減法の影響評価

中 矢 猛[†] 杉 浦 彰 彦[†]

Bluetooth や無線 LAN 等の ISM 帯域を使用する近距離無線通信の普及にともない、電波干渉による通信速度の低下が懸念されている。本稿ではとくに Bluetooth の他局間干渉を低減する方式を提案し、その効果について検討する。まず Bluetooth における異なるネットワーク間の電波送信状態として、現在行われている非同期式周波数ホッピングと提案方式の適用によって実現する同期式周波数ホッピングについて、それぞれの他局間干渉に対する通信への影響を周波数利用率をもとに比較した。その結果、提案方式が他局間干渉低減に有効であることを確認した。次に、提案方式適用後の準同期状態が Bluetooth 通信の周波数利用率に与える影響について計算機シミュレーションと実験による評価を行った。その結果、Bluetooth 端末は準同期状態に対しても適用が可能であることを示した。

Affect of Channel Interference Reduction in the Short Distance Wireless Communication by Using Frequency Hopping

TAKESHI NAKAYA[†] and AKIHIKO SUGIURA[†]

We propose the method to reduce radio frequency interference about Bluetooth, a short distance wireless technology. The Bluetooth channels between different piconets are asynchronous frequency hopping. Therefore, effects of channel interference are stronger than synchronous frequency hopping. For this reason, we try to change from asynchronous state to synchronous state on transmit radio wave for channel interference reduction. In this article, we evaluate the spectral efficiency on asynchronous and synchronous frequency hopping. And we examine the damage that the gap quantity caused by semi-synchronous inflicts on a spectral efficiency. A semi-synchronous is occurred by an application of proposal method. As a result, we confirmed that the proposal method is effective for channel interference reduction.

1. ま え が き

近年、携帯情報端末や CATV 等の普及にともない、有線系のネットワークと情報機器との接続や、家庭にある様々な機器を相互接続して利用する手法が目立っている。これらの接続手法としては Bluetooth や無線 LAN 等の ISM 帯域を使用する近距離無線通信が普及している。一方で、これらの応用例として Bluetooth を利用した ITS 向けの路車間通信システム等が提案されており¹⁾、近距離無線通信を拡張した広範囲の通信への利用も検討されている。しかし、無線接続では周囲の雑音や通信機器の送信信号による他局間干渉の影響が懸念されている。とくに ISM 帯域は様々な通信方式が乱立しているため、電波干渉にともなう

周波数利用率の低下が問題となっており、その解決策が関心を集めている^{2)~4)}。

ISM 帯域における Bluetooth と無線 LAN の相互干渉を抑える取り組みとして IEEE802.15 部会が発足され、それぞれのパケットを時分割で送受信する方式や、Bluetooth のホッピングパターンを無線 LAN 対応製品に通知することで両者の信号が衝突するのを防ぐ方法が提案されている。また、Bluetooth が通信を行う前段階で干渉の少ないホッピング周波数を選択し、その周波数を通信に使用方法も検討されている⁵⁾。しかし、これらの方法は、無線 LAN と Bluetooth の規格を変更する必要がある⁶⁾、Bluetooth 端末の受信感度を上げる必要がある⁷⁾。さらにこれらの方式を適用すると、Bluetooth が使用する周波数帯域や送信時間が制限されることから、端末の増加により電波干渉の影響は悪化する。Bluetooth は先に述べた有線系のネットワークとの接続のほか、とくに携帯

[†] 豊橋技術科学大学大学院
Graduate School of Engineering, Toyohashi University
of Technology

電話やヘッドセット間の接続等を想定しており、無線 LAN に比べ様々な利用形態が想定され、利用場所も限定されない。

このことから、本稿では Bluetooth の電波干渉を低減する方式を検討する。Bluetooth では周波数ホッピングスペクトル拡散通信方式を適用しているため、狭帯域雑音や他のスペクトル拡散方式からの干渉についてはその影響を抑えることができる。しかし、同じ通信方式からの干渉の低減は難しく、とくに他局（自ネットワーク以外の通信）間干渉は、非同期となるため影響が大きい。そこで我々は、他局間干渉の低減法として普遍同期方式を提案する。普遍同期方式を適用することで、対象となるすべての Bluetooth 機器を準同期状態とし、複数の送信局から発信されるパケットどうしの衝突を抑える。普遍同期方式は、現在の Bluetooth 規格に対して変更を加える必要がなく、法規制による制約もないことから他局間干渉低減法としては有用な手法であるといえる。

本稿では、最初に Bluetooth の異なるネットワーク間の通信状態について、現在行われている非同期状態と、普遍同期方式の適用によって実現する準同期状態における他局間干渉の影響を比較する。そして普遍同期方式適用後の準同期状態が Bluetooth の周波数利用効率に与える影響について、計算機シミュレーションと実験により評価する。

2. Bluetooth ネットワーク

Bluetooth 端末で構成するネットワークの最小単位をピコネットと呼ぶ⁶⁾。図 1 に同一ピコネットに属する Bluetooth 端末間の通信と異なるピコネットの端末間で発生する信号衝突を示す。ピコネットを構成する端末は、ピコネット全体を制御するマスタと、マスタから制御を受けるスレーブとに分けられる。ピコネット内の通信は必ずマスタを経由して行われる。ピコネット内の通信は時分割複信で、すべてのスレーブはマスタの内部クロックに基づいてデータ送信タイミングを決定する。異なるピコネットからの干渉（他局間干渉）に対しては、お互いのパケット送信タイミングが異なることから、図のようにピコネット A と B の信号が部分的に衝突する。

図 2 に同期式と非同期式周波数ホッピングによるホッピング信号の衝突を示す。ここで、同期式周波数ホッピングとは対象となるすべての送信局が同一のタイミングでホッピング周波数を変化させる方式である。この方式はすべての送信局の内部クロックが同一のタイミングで動作することで適用可能となる。また、非

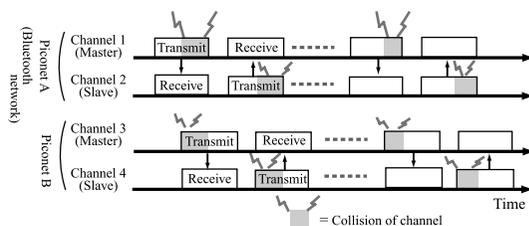


図 1 ピコネット内通信と他ピコネットとの干渉
Fig. 1 Internal piconet communication and interference with external piconet on Bluetooth.

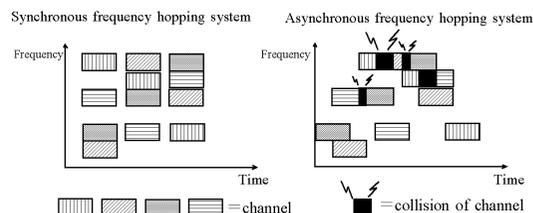


図 2 同期式周波数ホッピングと非同期式周波数ホッピング
Fig. 2 Synchronous frequency hopping system and asynchronous frequency hopping system.

同期式周波数ホッピングとは対象となる送信局が異なるタイミングでホッピング周波数を変化させる方式である^{7),8)}。非同期式周波数ホッピングは同期式周波数ホッピングに比べ、送信局が 1 ホッピング中に他局がホッピング周波数を変更することから、ホッピング周波数の衝突を起こす確率が高くなる。とくに Bluetooth は 1 ホッピングにつき 1 パケットのデータを送信しているため、送信パケットの一部分でもホッピング衝突が起こるとパケット誤りが発生し、通信に多大な干渉の影響を及ぼす。

3. 普遍同期方式の適用

本稿では、他局間干渉局との間で発生する非同期式周波数ホッピングを同期式周波数ホッピングにするための方法として、Bluetooth 端末に普遍同期方式を適用することを提案する。普遍同期方式とは、送受信局間がともに正確で普遍的な信号（同期信号）を使ってクロック同期をとる方式である⁹⁾。この方式では、従来の通信同期方式に比べ同期の捕捉・追跡が不要となり、装置の簡略化が可能となる。また、同期信号として GPS 信号のような、すでに携帯電話機等で受信が可能なものを利用することで、Bluetooth のコンセプトである小型化・低消費電力化・低価格化を満たすことができる。そして本方式の適用にあたって、Bluetooth モジュールに対しては内部クロックの発振タイミングを操作するだけで対応できるため、現在の Bluetooth

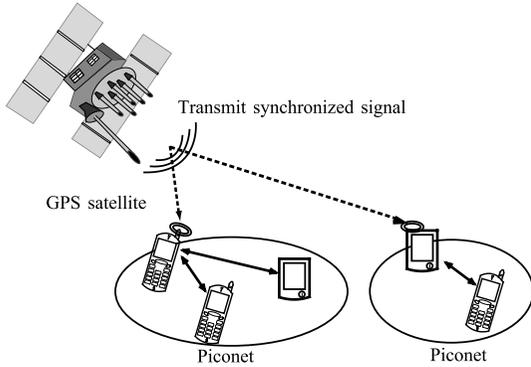


図 3 普遍同期方式 (GPS 信号)
Fig. 3 Universal timing synchronization system.

規格に変更を加えることなく実現可能である。図 3 は、GPS 衛星から発信される GPS 信号を Bluetooth の同期信号として用いた場合の普遍同期方式の概念である。GPS 信号は測位を行う目的で、高精度な時刻情報を保持している。図の例では 2 つのピコネットが受信した同期信号に基づいて周波数ホッピングを行っているため、同期式周波数ホッピングとなり、他局間干渉の影響を抑えることができる。また、文献 1) のように 1 台の Bluetooth 端末が複数のピコネット間を移動する場合に、対象となるピコネットや端末に普遍同期方式を適用すると、端末は移動元とその先のピコネット間でパケット送信タイミングが一致していることから、移動先ピコネットでのピコネット内同期の手続きが簡素になり、接続までの時間を短縮することができる。

一方で、普遍同期方式適用時に懸念される問題として、同期信号の発信源と各 Bluetooth 端末間における距離差 (同期信号の到達時間の差) や経路差等により送・受信局間でタイミング (クロック) のずれが生じてしまう。このように、完全な同期状態ではなくわずかな同期ずれが発生している状態のことを準同期状態と呼ぶ。この問題はとくに、1 台の Bluetooth 端末が複数のピコネットを移動している場合に顕著となる。本稿では、5 章で準同期状態による同期ずれが周波数利用効率に及ぼす影響を調査し、ピコネット内で正常なパケット送受信が可能な許容量の最大値 (同期ずれ許容量) を明確にする。

4. 同期式、非同期式周波数ホッピングにおける電波干渉の影響

異なるピコネットに属する送信局間のパケット送信タイミングについて、非同期式と同期式によるホッピング周波数衝突率を比較する。この比較は、計算機シ

表 1 シミュレーションモデル
Table 1 The simulation model.

Spreading modulation	Frequency Hopping (79 channels hopping)
Spreading speed	1600 hops/s
Error Correction (Payload)	<ul style="list-style-type: none"> · No error correction · (15,10) short hamming code · 3-times repetition
Packet size	336 bits
Transmit distance	10 m
channel Noise	White noise (environmental noise)

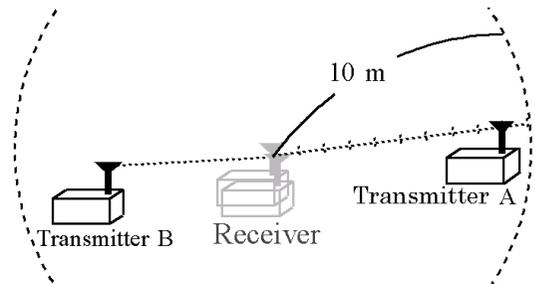


図 4 送信局の配置例
Fig. 4 Arrangement of the transmitter and receiver.

ミュレーションと実験で行う¹⁰⁾。さらに、計算機シミュレーションでは、いくつかの Bluetooth パケットタイプを適用し、環境雑音にともなう周波数利用効率への影響について検討する。実験では、まず Bluetooth モジュールを用いて、非同期式周波数ホッピング時におけるパケット誤り率を測定する。次に、実験用に作成した周波数ホッピング送受信機を用いて非同期式と同期式によるパケット誤り率の比較を行う。

4.1 計算機シミュレーション

4.1.1 概要

シミュレーションモデルを表 1 に示す。拡散変調方式や拡散変調速度、誤り訂正方式は Bluetooth 規格に則したものとする。またパケットサイズは Bluetooth 規格の中から最も小さいものを選択した。通信距離は Bluetooth の送信電力が最も小さいクラス 3 (1mW) を想定して半径 10m 以内とし、図 4 のように対象となる複数の送信局や他局間干渉源を受信局を中心として 1m おきに配置する。通信距離による送信電力の減衰は次式に示す自由空間伝搬損失を用いて近似する^{8),11)}。

$$\text{伝播損失 [dB]} = 20 \log_{10}(4\pi d/\lambda) \quad (1)$$

d : 距離 (m) λ : 送信波の波長 (m)

通信路に存在する雑音は白色雑音とする。そして各送信局の送信電力はすべて同一とし、ホッピング周波

Access code (72 bit) no error correction	Header (54bit) 3-times repetition	Payload (240 bit) Depends on the state of channel
--	---	---

図5 パケット構造
Fig. 5 Packet structure.

数の衝突時には、電力の弱い信号が干渉を受け、パケット誤りを起こす。

4.1.2 ホッピングパターンの生成と平均ホッピング周波数衝突率

各送信局が発振するホッピングパターンの生成には、周波数シンセサイザである DDS (Direct Digital Synthesizer) を使用する。DDS への入力段数は 7 段とした。また、DDS に入力する符号系列は Bluetooth アドレス長と同じ 28 ビットとする。そしてこの系列長で生成されるすべてのホッピングパターンについて他局とのホッピング周波数衝突率を計算し、その平均値を算出する。ホッピング周波数衝突率の算出方法は、下式に示すようにホッピングパターン 1 周期中に他局のホッピング周波数と一致した数を 1 周期長で割った値である。

$$\text{ホッピング周波数衝突率} = \frac{\text{周波数の一致数}}{\text{1 周期長}}$$

しかし、この条件でシミュレーションを行うと、DDS へ入力する符号の組合せが多く、計算量が膨大となり結果を算出することが困難である。そこで今回は、測定可能な符号長で計算を行い、その結果に基づいて符号長 28 ビットの平均ホッピング周波数衝突率を推測することにした。

4.1.3 パケット構造

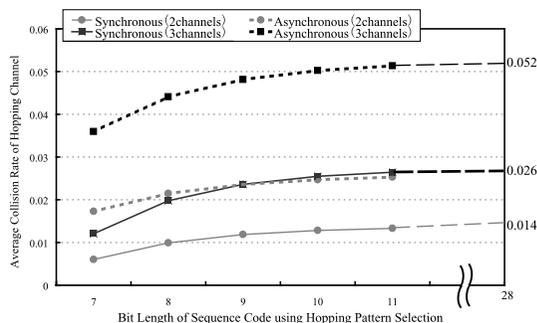
シミュレーションで使用するパケット構造を図 5 に示す。Bluetooth パケットはアクセスコード部分とヘッダ部分、ペイロード部分に分かれている。また、ヘッダ部分とペイロード部分には誤り訂正機能があり、ヘッダ部分にはすべてのパケットタイプで共通に 3 ビットの単純繰返し法 (3 多数決法) による誤り訂正を適用する。そして、ペイロード部分には次の 3 つの誤り訂正方法の中から 1 つを使用する¹²⁾。

- (1) 誤り訂正なし
- (2) 符号化率 2/3 のショートハミング符号
- (3) 符号化率 1/3 の 3 多数決法

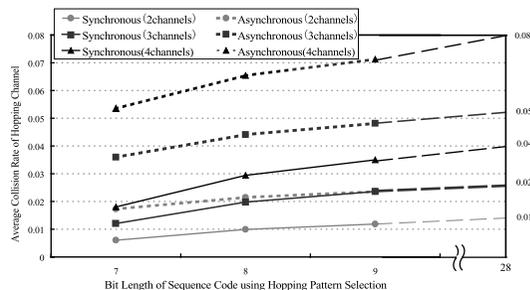
受信側では、誤り訂正適用後のパケット中に 1 ビット以上の誤りがあれば、そのパケットを誤りとする。

4.1.4 他局間干渉によるホッピング周波数衝突率

図 6 (a) に送信局が 2 局 (干渉局が 1 局) と 3 局 (干渉局が 2 局) の同期または非同期式の平均ホッピ



a. Number of transmitter: 2, 3



b. Number of transmitter: 2 ~ 4

図 6 DDS に入力する符号系列長ともなる平均ホッピング周波数衝突率

Fig. 6 Average hopping channel collision rate with bit length of sequence code.

ング周波数衝突率を示す。横軸は DDS に入力する符号系列長で、シミュレーションでは 7 ビットから 11 ビットまで行った。結果より、送信局が 2 局の場合の同期式周波数ホッピングにおける平均ホッピング周波数衝突率は以下の式で示される。

$$a_n = 0.00603 + \frac{0.0039(\frac{1}{2}^{n-7} - 1)}{\frac{1}{2} - 1}, n \geq 7 \quad (2)$$

ここで、 n は DDS に入力する符号系列長であり、 a_n が n における平均ホッピング周波数衝突率となっている。式 (2) より符号系列長 n が増加するにつれて平均ホッピング周波数衝突率が収束することが確認できる。以上の結果より、符号系列長が 28 ビットの場合の平均ホッピング周波数衝突率は 0.014 となる。また、送信局が 2 局で非同同期式周波数ホッピングにおける結果についても以下の式で示される。

$$a_n = 0.0173 + \frac{0.0042(\frac{1}{2}^{n-7} - 1)}{\frac{1}{2} - 1}, n \geq 7 \quad (3)$$

n と a_n は式 (2) と同様である。式 (3) より非同同期式においても符号系列長の増加により平均ホッピング周波数衝突率が収束することを確認した。また、符号系列長が 28 ビットにおける平均ホッピング周波数衝突率は 0.026 となった。次に、送信局が 3 局の同期式

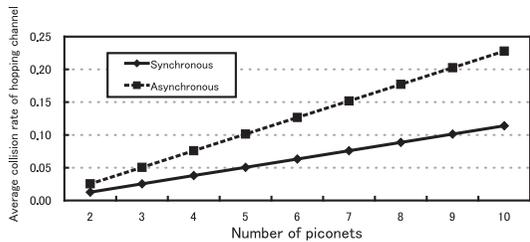


図 7 ピコネット数による平均ホッピング周波数衝突率
Fig. 7 Average hopping channel collision rate with number of piconets.

と非同期式についても 2 局の場合と同様に符号系列長が増加するにつれて平均ホッピング周波数衝突率が収束することを確認した。そして、符号系列長が 28 ビットにおける平均ホッピング周波数衝突率は同期式で 0.026, 非同期式で 0.052 となった。これより送信局の増加にともなうホッピング周波数衝突率の影響については、同期・非同期式ともに 3 局の場合が 2 局の約 2 倍となることを確認した。また、同じ送信局数に関しては非同期式の衝突率が同期式のほぼ 2 倍となることを確認した。さらに、図 6 (b) に送信局が 4 局 (干渉局が 3 局) の場合を追加したグラフを示す。ここでは計算量を考慮して符号系列長を 7 ビットから 9 ビットとした。図より送信局が 4 局の場合も、2 局と 3 局の場合と同様の傾向が得られており、符号系列長が 28 ビットにおける平均ホッピング周波数衝突率は同期式で 0.04, 非同期式で 0.08 となった。

以上の結果をもとに、図 7 にピコネット数による平均ホッピング周波数衝突率を示す。図より一定のエリア内に 10 個のピコネットが同時に存在した場合には、同期式周波数ホッピングのホッピング周波数衝突率が 0.11 改善される。Bluetooth はその用途から個人で所持している端末どうしでピコネットを構成することが多く、狭いエリア内でも多くのピコネットが混在する。したがって、普遍同期方式の適用による他局間干渉の低減効果は大きくなる。

4.1.5 環境雑音による周波数利用効率

はじめに、今回測定する周波数利用効率とは、単位時間、単位帯域あたりに送信可能な最大の情報量である。したがって周波数利用効率は、ホッピング周波数衝突率と環境雑音によって生じるビット誤りによって変化する。ホッピング周波数衝突率や雑音が増大すれば周波数利用効率は低下する。測定は同期式と非同期式の比較に加え、パケット中のペイロードに適用する誤り訂正方法による比較も行った。シミュレーションによるホッピング周波数衝突率の適用については、前項の結果をもとに送信パケットに対してランダムに誤

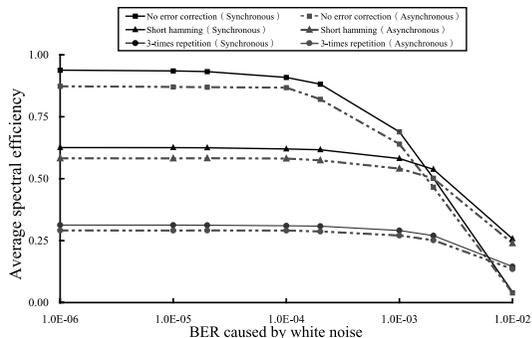


図 8 白色雑音によるビット誤り率にともなう周波数利用効率 (送信局数: 10)
Fig. 8 Spectral efficiency with BER caused by white noise (10 channels).

りを発生させる。本シミュレーションでは、白色雑音によって発生するビット誤り率 (送信ビット数に対する誤りビットの割合) にともなう周波数利用効率を測定した。

図 8 に送信局が 10 局で、それぞれが受信局から 1 m から 10 m まで 1 m おきに配置した場合の周波数利用効率を示す。横軸は白色雑音によって発生するビット誤り率である。縦軸は周波数利用効率であり、ここでは他局間干渉や雑音がまったくないときの値を基準に正規化した。図のように同期式と非同期式では、周波数利用効率においても同期式の適用による効果が確認できた。前項で述べたとおり、この効果は互いに影響を及ぼすピコネット数が増加するにつれて大きくなる。また、白色雑音による周波数利用効率への影響については、ビット誤り率が 10^{-3} から 10^{-2} にかけて、ペイロードにショートハミング符号を適用した場合が誤り訂正なしの場合より周波数利用効率が高くなっていることが確認され、それ以降は誤り訂正なしが周波数利用効率の悪い方式となっていることが分かる。Bluetooth の受信感度は 10^{-3} のビット誤り率を得られる最低信号レベルとして -70 dBm を規定している⁶⁾ が、実際にはこの規定に対してより高性能な受信感度を備える Bluetooth モジュールも多数開発されている。このため ISM 帯域に影響を及ぼす機器からの妨害がなければ 10^{-6} のビット誤り率を実現可能である。また、通常の利用時においてもビット誤り率が 10^{-3} を超えることは少ないことから誤り訂正方式の適用は不必要となる。しかし、とくに ISM 帯域を利用する他の機器からの妨害が強い場合等ではビット誤り率が悪化し誤り訂正符号の適用による周波数利用効率の向上が見込める。

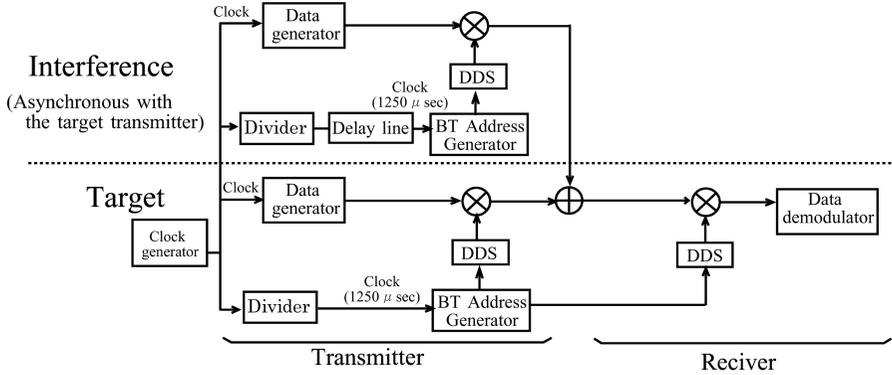


図 9 周波数ホッピング送受信システム

Fig. 9 The Frequency hopping communication system.

表 2 送信局数にともなうパケット誤り率 (非同期式)

Table 2 Packet error rate with number of transmitter (asynchronous).

	Number of transmitter		
	1	2	3
Packet error rate	0.00065	0.02597	0.06128

表 3 同期式・非同期式周波数ホッピングのパケット誤り率 (送信局 2 局)

Table 3 Packet error rate with a channel interference (synchronous and asynchronous frequency hopping).

	Synchronous	Asynchronous
Packet error rate	0.00596	0.01104

4.2 実験

4.2.1 Bluetooth 送受信局を用いた測定

本実験では、実際に Bluetooth モジュールを使用して他局間干渉にともなうパケット誤り率を測定する。パケット誤り率は、送信パケットのうち、受信局で誤り訂正を行った後にも、誤りが残っているパケットの割合である。実験では送信局を 3 局まで用意し、そのうちの 1 局についてパケット誤り率の測定を行った。そして、測定対象となる受信局を中心とする半径 1 m の円状に送信局と他局間干渉局を設置した。各送信局の送信電力については、測定対象がホッピング周波数衝突時に確実にパケット誤りとするために、他局間干渉局に比べ低く設定する。また、すべての Bluetooth モジュールの送受信パケットタイプとして DH1 を使用し、測定時には 10^6 パケットの送受信を行う。DH1 パケットは図 5 のパケットでペイロード部分の誤り訂正を行わないものである。また現在の Bluetooth 規格では、他局間干渉局とは非同期式周波数ホッピングとなるため、今回は非同期式でのみ測定を行った。実験結果を表 2 に示す。本結果を 4.1.4 項で求めたピコネット数による平均ホッピング周波数衝突率と比較すると、2 局と 3 局の場合の非同期式周波数ホッピングの実験結果とほぼ一致している。これは、他局間干渉なしの場合におけるパケット誤り率が低いことから、今回の結果がパケット衝突によるものであると確認できる。したがって、シミュレーションにより求め

た非同期時のピコネット数の増加にともなうホッピング周波数衝突の増加率が実測結果と一致することを確認した。

4.2.2 周波数ホッピング送受信機を用いた測定

図 9 に実験のシステム構成を示す。図のように実験では送信局を 2 局用意する。このうちの 1 局が測定対象で、残りの 1 局が干渉局となる。2 台の送信局について、周波数ホッピングのホッピング間隔は $1,250 \mu\text{sec}$ ($1,600 \text{ hops/sec}$) とし、1 ホッピング中に 1 パケットを送信する。また、Bluetooth アドレス発生器 (BT address generator) には PN 符号発生器を使用し、DDS への入力段数は 7 段とする。そしてホッピング可能な周波数も Bluetooth 規格を参考にした。同期式と非同期式周波数ホッピングの適用方法として、DDS へ入力するクロックのタイミングを操作する。すなわち、同期式では測定対象の送信局と干渉局が同一のクロックを使用し、非同期式では干渉局側のクロックを測定対象の送信局側に対して $625 \mu\text{sec}$ 遅らせる。ホッピング衝突はパケット誤り率によって評価する。本システムで測定されるパケット誤りは、ホッピング衝突によって発生するパケット誤りのみである。パケット誤りに対する誤り訂正は行わない。パケット誤り率測定は、同期式と非同期式それぞれで 10^6 パケットの送受信を 10 回行い、これらの平均値をとった。

実験結果を表 3 に示す。結果よりシミュレーションと同様、同期式のパケット誤り率は非同期式の半分

なることを確認した。ここで、同期式と非同期式の packets 誤り率が 4.1.4 項のシミュレーションによるホッピング周波数衝突率と比較して半分となっている。これは、本実験では測定対象の送信局と干渉局の送信電力を同値に設定しており、2 局間の電力差が機器の性能による送信電力のわずかな変動のみとなっているためである。ホッピング周波数衝突時には、電力の弱い信号が干渉を受けパケット誤りを起こす。このため、本システムでは、ホッピング衝突ごとに発生するわずかな差により 1/2 の確率で送信側がパケット誤りを起こし、残りは干渉局のパケット誤りとなっている。この現象は、4.1.5 項の周波数利用効率の測定で検討したホッピング周波数衝突によって生じるパケット誤り率の検討によって確認することができる。本項の実験と同様に 2 局を対象としたホッピング周波数衝突率にともなうパケット誤りでは、1 回のホッピング衝突につきどちらか一方のパケットしか誤らない。このため、平均パケット誤り率は平均ホッピング周波数衝突率の半分となり、表 3 の結果とおおむね一致する。以上の結果から、計算機シミュレーション同様、実測によって同期式周波数ホッピングの適用が他局間干渉を低減する手段として有効であることを確認した。

4.3 パケットタイプによる他局間干渉の影響とスループット

4.1, 4.2 節の実験では、Bluetooth パケットについて図 5 のパケット構造をもとにペイロードに 3 つの誤り訂正方式を適用した。本節では、このほかに規定されている様々な Bluetooth パケットタイプを適用した場合のホッピング周波数衝突率について、これまでの結果をもとに同期式と非同期式で比較する。さらに、これらのスループットの比較を行い、同期式周波数ホッピングによる他局間干渉低減効果について検討する。

Bluetooth で規定されているパケットタイプは、接続方式によって分類することができる。接続方式は SCO (Synchronous Connection Oriented) リンクと ACL (Asynchronous Connection Less) リンクからなる。SCO リンクは主に音声情報の伝送に利用されるものであり、ACL リンクではマスタと複数のスレーブ間による 1 対多のデータ通信で利用される。SCO リンクで利用されるパケットタイプは 4 種類で、それぞれのペイロードに適用される情報の種類や誤り訂正符号が異なるがパケット長は同じである。そして、ACL リンクで利用されるパケットは、ペイロード部分の誤り訂正方式に加え、ペイロード長の異なるパケットが規定されている。ここで、パケット長は 1 タイムスロット

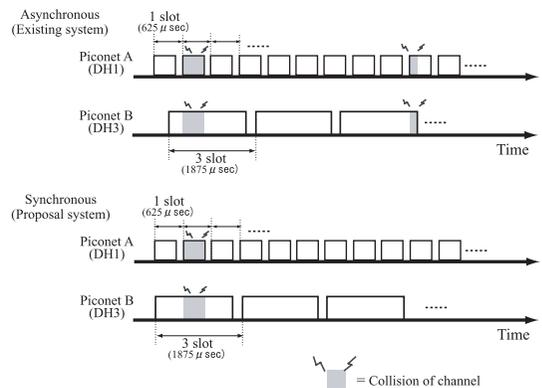


図 10 異なるパケットタイプによるホッピング周波数衝突 (DH1, DH3)

Fig. 10 Collision of hopping channel from different types of packet.

を $625 \mu\text{sec}$ とした場合に占有するタイムスロット数で区分すると、1 個パケットが 1 スロットを占有する DH1 と DM1, 3 スロットを占有する DH3 と DM3, 5 スロットを占有する DH5, DM5 となる。また、同一のスロット数を占有する 2 つのパケットはペイロード部分の誤り訂正方式の適用の有無によって区別され、たとえば DH1 は誤り訂正なしで、DM1 が符号化率 $2/3$ のショートハミング符号を適用している^{2),6),13)}。

同期式と非同期式周波数ホッピングの比較について、異なるピコネットに属する送信局が様々なパケットタイプを使用した場合の平均ホッピング周波数衝突率は、これまでの結果をもとにパケットタイプが占有するタイムスロット数により評価することが可能である。たとえば、同じタイムスロット数のパケットどうしの平均ホッピング周波数衝突率は、対象側の 1 パケット分の送信時間に対する干渉パケットの重なり数が同期式、非同期式ともに 4.1.4 項と同じであることから、同期式が非同期式の $1/2$ となる。また、それぞれの送信局が異なる占有スロット数となるパケットタイプを使用する例として、2 つのピコネットの各々が DH1 と DH3 のパケットタイプを使用したときのホッピング周波数衝突の状態を図 10 に示す。図では、それぞれのピコネット (Piconet A, Piconet B) 内で送信されるすべてのパケットを 1 つの軸にまとめている。図の上側に示した非同期式周波数ホッピングでは、1 つの DH3 パケットの送信時間が 4 つの DH1 パケットの送信時間と重なっており、4.1.4 項で想定した非同期式 (1 つのパケットに対して 2 つのパケットの重なり) の重なり数と比較して 2 倍となる。また図の下側に示す同期式周波数ホッピングでは、1 つの DH3 パケットの送信時間が 3 つの DH1 パケットの送信時間と重なっ

表 4 平均周波数ホッピング衝突の改善 (ピコネット数: 2)

Table 4 Improvement of average collision rate of hopping channel (number of piconets: 2).

		Number of time-slot (interference)		
		1	3	5
		Number of time-slot (Target)	1	3
	1	1/2	3/4	5/6
	3	3/4	1/2	3/4
	5	5/6	5/6	1/2

ている。これより 4.1.4 項で想定した同期式 (1 つパケットに対して 1 つのパケットの重なり) の重なり数と比較して 3 倍となる。このことから、同期式周波数ホッピングによる DH3 パケット側の平均ホッピング周波数衝突率を非同期式と比較すると、4.1.4 項による平均ホッピング周波数衝突の増加率である $1/2$ とパケット重なり数の増加率である $3/2$ の積により、同期式が非同期式の $3/4$ 倍となり、同期式により平均ホッピング衝突率が減少する。表 4 にピコネット数が 2 の場合の平均ホッピング周波数衝突率について、同期式の非同期式に対する増加率を示す。表の左側の項目は測定対象が送信するパケットタイプの占有スロット数であり、上側の項目は干渉側 (もう一方の送信局) が送信するパケットタイプの占有スロット数である。そして表の結果は、それぞれの占有スロット数の組合せにおいて、同期式の測定対象側の平均ホッピング周波数衝突率が非同期式の何倍となっているかを示す。結果より、すべてのパケットタイプの組合せにおいて同期式が非同期式に比べ他局間干渉の低減に有効な方式であることを確認した。

次に、同期式と非同期式周波数ホッピングのスループットについて検討を行う。スループットとは、パケットあるいはプロトコルのオーバーヘッドに起因した性能の劣化を考慮した実効転送速度である。スループットに影響を与えるパケット誤り時の動作について、Bluetooth では主な ACL パケットでパケット再送制御を適用している。ここで、パケット誤り検出後に行うパケット再送の通知は、再送要求側が送信するパケットのヘッダ部分で行っている。このため、再送要求時のパケットのペイロード部分に新しいユーザデータを加えて送信することが可能である²⁾。したがって、パケット再送制御によるスループットへの影響は、誤りパケット中に含まれるデータ量のみの速度低下にとどまる。表 5 にこれまでの実験結果をもとに、ピコネット数が 10 個の場合の同期式と非同期式の平均スループットを示す。表では主な ACL パケットについて、ピコネット内の双方向の通信で同じパケットタイプを使用した場合 (対称型) の結果に加え、各パケットタイプの最大

表 5 平均スループット (ピコネット数: 10・対称型)

Table 5 Average throughput (number of piconets: 10, symmetric).

	Maximum (kbps)	Asynchronous (kbps)	Synchronous (kbps)
DM1	108.8	81.2	95.0
DH1	172.8	129.0	150.9
DM3	258.1	192.7	225.4
DH3	390.4	291.5	340.9
DM5	286.7	214.1	250.4
DH5	433.9	323.9	378.9

スループットも示す。ここで、最大スループットとはパケット誤りがまったく発生していない場合のスループットである。また、同期式と非同期式のスループットでは 10 個のピコネットが同じパケットタイプを使用し、環境雑音は十分に小さく通信に悪影響を及ぼさない場合を想定する。結果より今回の条件においては、同期式が非同期式に比べ DM1 で約 14 kbps, DH5 で 55 kbps 改善された。これより同期式によるスループットの増加量は、パケットタイプが占有するスロット数が多く、誤り訂正を行っていないものほど大きくなることを確認した。

5. 普遍同期方式適用時の同期ずれに対する周波数利用率への影響

5.1 計算機シミュレーションによる同期ずれ許容量の検討

普遍同期方式適用時の準同期状態にともなう同期ずれが周波数利用率に与える影響について検討する。まず、Bluetooth の同期ずれ許容量について計算機シミュレーションを行う¹⁴⁾。

5.1.1 同期ずれの発生方法

シミュレーションでは、送信局と受信局がそれぞれ 1 台ずつ置かれた 1 組のピコネットを想定した。また送・受信局間の同期ずれ量については、図 11 に示すように、完全に送受信タイミングが一致している状態から、前後 1 ビットずつずらしていき、これを受信行為時に送信パケットをまったく受信できなくなるまで行う。図は、チャンネル 2 のパケット受信開始 (受信行為) 時刻が、チャンネル 1 のパケット送信 (送信行為) 時刻よりも早い場合を想定したものである。

5.1.2 同期ずれ時の受信パケットの処理方法

送受信時に使用するパケットタイプは DH1 とする。Bluetooth パケットのアクセスコードには、ピコネットの識別や通信タイミングの補正等に用いるシンクワードを含んでいる。そして、同期ずれにともなう受信側でのパケット受信の可否はアクセスコード関連器

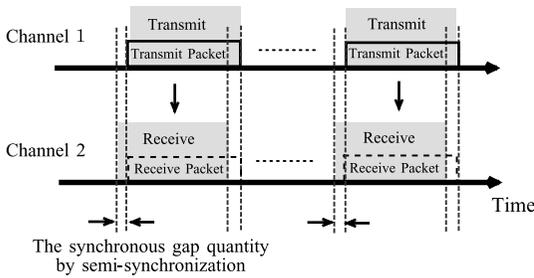


図 11 シミュレーションで想定した同期ズレ量

Fig. 11 Quantity of synchronization gaps in simulation.

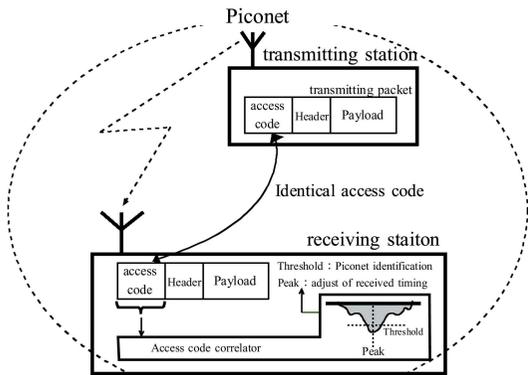


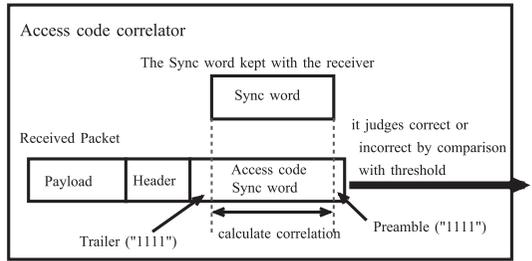
図 12 アクセスコード相関器の役割

Fig. 12 Role of access code correlator.

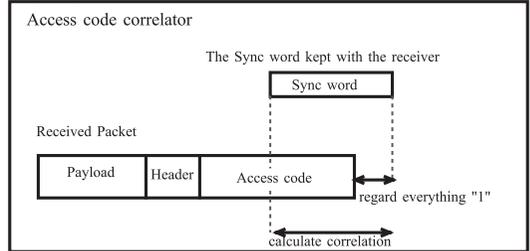
により決定される．アクセスコード相関器は図 12 に示すように，あらかじめ受信局側で保持しているシンクワードと受信したパケットのアクセスコード中にあるシンクワードとの相関を求めることでピコネットの識別を行う¹³⁾．この相関値が高い場合は，受信パケットが自分のピコネット宛てのものと認識するが，相関が低いとそのパケットは別のネットワーク宛てのものと認識してしまう．また，相関値のピーク値を取り出すことで，送受信タイミングのずれを補正している．

同期ズレ量は図 13 に示すようにアクセスコード相関器への入力タイミングのずれとして処理される．本稿では，アクセスコード相関器が完全に同期がとれている場合に比べ早いタイミングで比較を始めた場合，すなわち受信局がアクセスコード相関器へのビット入力を終了した時点で送信パケットのアクセスコードの後方部分が残っている状態のずれをプラス方向のずれとする．また，アクセスコード相関器が同期ずれなしの場合に比べ遅いタイミングで比較を始めた場合のずれをマイナス方向のずれとする．相関値については，以下に示すようなデジタル符号における符号相関の

No synchronization gap



Gap of plus direction



Gap of minus direction

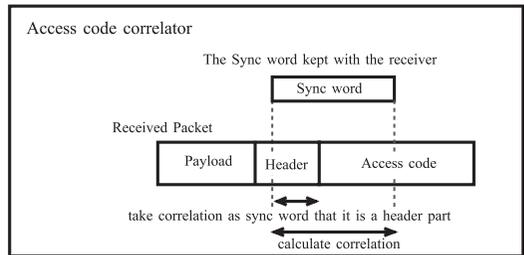


図 13 同期ずれによるアクセスコード相関器の入力ずれ

Fig. 13 Input gap of access code correlator caused by synchronization gap.

算出法を用い，受信側が保持しているシンクワードと受信パケット中のシンクワードと見なされた部分との比較を行う．

$$\text{符号相関} = \frac{\text{一致数} - \text{不一致数}}{\text{シンクワードの符号長}} \quad (4)$$

同期ずれ発生時の相関値として，設定した同期ずれ許容範囲内で測定される相関の中から最大値を適用する．

5.1.3 シミュレーション結果

シミュレーション結果を図 14 に示す．図の横軸は同期ズレ量で，前項で述べたプラス方向とマイナス方向へのずれを示している．縦軸は想定したズレ量でパケットを受信した場合の相関値で，図の下側が相関値 1 である．図では同期ずれに対する許容量として，シンクワードのビット数をもとに以下の 3 つを設定した．

- (1) 同期ずれ許容量なし (0 ビット)
- (2) シンクワードのビット長の半分 (32 ビット)

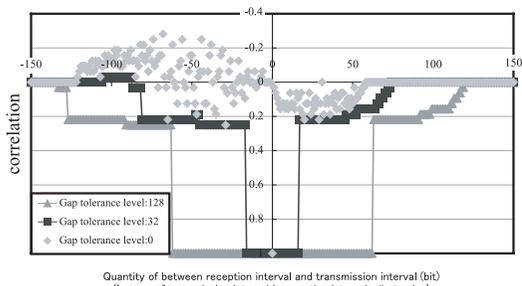


図 14 同期ずれにともなう相関値 (シミュレーション)

Fig. 14 Correlation value with synchronization gap.

(3) シンクワードのビット長の 2 倍 (128 ビット) また本結果の SN 比について、ノイズは十分に小さいものとし通信に悪影響を及ぼさない。

結果より、許容量なしの場合には完全に同期がとれている場合 (同期ずれ量が 0) が相関値 1 となっている以外はすべて 0.5 以下の低い値となっている。したがって、受信局側でのパケット受信の可否は同期ずれ許容量が 32 や 128 の場合についても、許容範囲内に同期ずれを起こしていない点が含まれていることが条件となることが分かる。

5.2 Bluetooth 送受信局を使用した実験による評価

計算機シミュレーションによる評価では、実際の Bluetooth 送受信局が内部に備えている同期ずれ許容量を測定することが困難である。これより本節では、Bluetooth 送受信局が内部に保持している同期ずれ許容量を、環境雑音や他局間干渉にともなう周波数利用効率をもとに、実際の Bluetooth 送受信局を用いて明確にする。

5.2.1 実験条件

表 6 に実験概要を示す。実験では周波数利用効率の測定対象として、1 つのピコネットを形成する送受信局を 2 台使用する。送受信局には CSR 社製の Bluetooth モジュールを使用した。測定は、環境雑音のみの場合と他局間干渉下で行い、それぞれで SN 比を変化させた。ここで、普遍同期方式適用後を想定した実験で非同期状態である他局との干渉の影響を測定するのは、普遍同期方式がすべての Bluetooth 端末で適用されることを想定していないため、本方式の適用範囲内にある端末が適用外の端末からの干渉を受ける可能性があるためである。送受信局が使用するパケットタイプは、計算機シミュレーションと同じ DH1 と Bluetooth パケットの中で最も占有パケットスロット数の大きい DH5 を使用した。他局間干渉下の実験で使用する干渉局については、測定対象となる送受信局

表 6 実験概要

Table 6 Experimental condition.

Number of the transmission and reception station	<ul style="list-style-type: none"> Two (use for the measurement of spectral efficiency) Two (use for the channel interference source)
Spread modulation	Frequency Hopping (79 channels hopping)
Noise	<ul style="list-style-type: none"> Environmental noise A signal from the other station (interference from other piconets)
Packet type	DH1, DH5 (Target) DH1 (Interference)

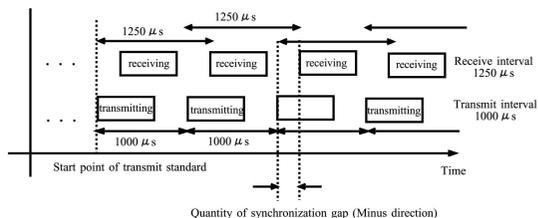


図 15 実測による送信間隔と受信間隔の差の実現方法

Fig. 15 Implementation method of synchronization gap with an actual machine.

とは異なるピコネットを形成する機器を使用し、実験中は測定対象のパケットタイプにかかわらず DH1 のパケットを送り続ける。本実験での周波数利用効率の評価にはパケット誤り率を使用する。

5.2.2 同期ずれの発生方法

実機で同期ずれを発生させる方法として、送信局と受信局の間で送・受信間隔を意図的にずらす。図 15 にパケットの送信間隔と受信間隔をずらした場合の送・受信局の通信状態を示す。図は、送受信局が使用するパケットを DH1 とした場合である。図のようにパケットの受信間隔を Bluetooth のホッピング間隔である $1,250 \mu\text{sec}$ ($1/1,600 \text{ sec}$) とし送信間隔を $1,000 \mu\text{sec}$ とした場合では、送信側の送信開始時刻を基準 ($0 \mu\text{sec}$) として、送信局と受信局の双方で設定した時間間隔に従ってパケットを送・受信する。このときに生じるパケット送信開始時刻とパケット受信開始時刻の差が同期ずれ量となる。このように、実機による同期ずれの発生法では送信局の送信開始時刻を基準としているため、図のような送信間隔が受信間隔より少ない場合に生じるずれ量をマイナス方向のずれ量とした。そして、送信間隔が受信間隔より大きい場合をプラス方向のずれ量とする。なお、送受信局で使用するパケットとして DH5 を使用する場合のパケット受信間隔は $6,250 \mu\text{sec}$ とした。本実験では受信間隔

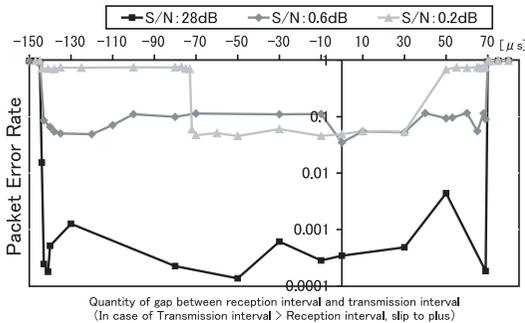


図 16 環境雑音下におけるパケット誤り率特性 (DH1)

Fig. 16 Packet error performance in environmental noise (DH1).

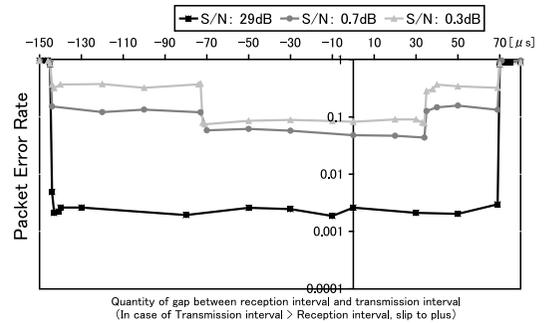


図 18 環境雑音下におけるパケット誤り率特性 (DH5)

Fig. 18 Packet error performance in environmental noise (DH5).

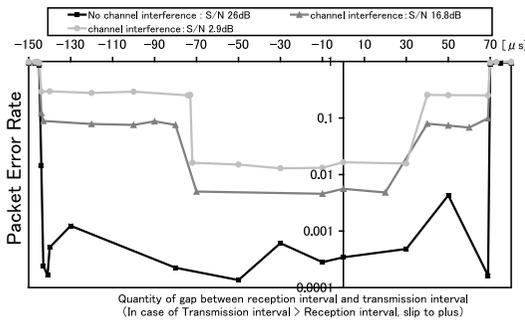


図 17 他局間干渉下におけるパケット誤り率特性 (DH1)

Fig. 17 Packet error performance in channel interference (DH1).

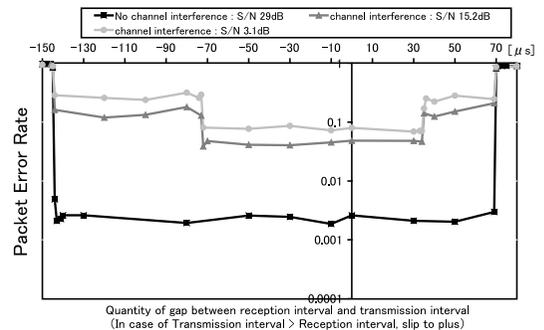


図 19 他局間干渉下におけるパケット誤り率特性 (DH5)

Fig. 19 Packet error performance in channel interference (DH5).

を固定し、送信間隔を変化させることで同期ずれ量を調整する。

5.2.3 実験結果

測定対象のパケットとして DH1 を使用した場合の環境雑音下の同期ずれ量にともなうパケット誤り率の実測結果を図 16 に示す。結果より、SN 比が 28dB の場合にずれ量が $-144 \mu\text{sec}$ から $69 \mu\text{sec}$ までは低いパケット誤り率を維持できることが分かる。そして、それ以降はパケット誤り率が急激に悪化する。これは、5.1.3 項のシミュレーション結果と同様の傾向となっていることから、この場合の同期ずれ許容量が $213 \mu\text{sec}$ であることが分かる。また、本実験で SN 比が最も低い 0.2dB の場合は、ずれ量が $-72 \mu\text{sec}$ から $30 \mu\text{sec}$ の間で低いパケット誤り率を維持する。このことから、SN 比の低下により同期ずれ許容量も低下することが確認できた。

図 17 に測定対象のパケットとして DH1 を使用した場合の他局間干渉下の同期ずれ量にともなうパケット誤り率を示す。図の横軸と縦軸は図 16 の結果と同様である。また図では、他局間干渉源との SN 比による結果のほかに、他局間干渉が存在しない場合の結果も示

した。結果より、他局間干渉下でパケット誤り率が 0.1 以下となるのは SN 比が 16.8 dB の場合で $-144 \mu\text{sec}$ から $69 \mu\text{sec}$ であった。さらに、SN 比が 2.9 dB では $-72 \mu\text{sec}$ から $30 \mu\text{sec}$ であった。これより環境雑音下と同様、他局間干渉下でも同期ずれ許容量が存在することが確認できた。また、SN 比の低下により同期ずれ許容量は低下することが分かる。

次に、測定対象のパケットとして DH5 を使用した場合の環境雑音と他局間干渉下におけるパケット誤り率特性について、それぞれの結果を図 18、図 19 に示す。なお図 19 では、DH1 の場合と同様に他局間干渉が存在しない場合の結果も示している。結果より、環境雑音下で SN 比が 29 dB の場合の同期ずれ許容量が $213 \mu\text{sec}$ となる。これは図 16 の結果の中で示した、SN 比が 28 dB の場合の許容量と一致する。さらに環境雑音下で SN 比が 0.3 dB の場合は $-72 \mu\text{sec}$ から $32 \mu\text{sec}$ でパケット誤り率が 0.1 以下となっていることから、DH1 と同様に SN 比の悪化にともなって同期ずれ許容量が減少することが確認できる。また、図 19 においても同期ずれ許容量を確認することがで

き, SN比が 3.1 dB の場合では $106 \mu\text{sec}$ となった. 以上の結果より, DH1, DH5 とともに $100 \mu\text{sec}$ 以上の同期ずれ許容量をとることを確認した.

本実験の結果をもとに普遍同期方式適用によって引き起こされる同期ずれ量について検討する. ここではとくに, 対象となる 2 台の Bluetooth 端末が離れた位置で同期信号を受信し, そのクロックを保持したまま互いの Bluetooth 通信範囲内まで移動して接続を行う場合を考える. これは 3 章で述べたピコネット間を移動する端末に対して, 普遍同期方式を適用した場合を想定しており, 適用例としては, 文献 1) による Bluetooth の ITS への応用があげられる. 普遍同期方式を適用した場合の同期信号源として GPS 衛星を使用する場合, GPS 衛星から各々の端末間までの距離差や, Bluetooth 通信時の端末間の経路差による同期ずれが許容範囲内となるのは, 同期信号受信時の端末間の距離にして数百 km となる. これは, Bluetooth の通信範囲として $10 \sim 100 \text{ m}$ を想定し, Bluetooth 端末間の距離差や経路差が 300 m となるときに $1 \mu\text{sec}$ の同期ずれが発生することから計算したものである. 以上の結果より, 文献 1) のような非常に広い範囲を移動する端末においても普遍同期方式を適用が有効であることを確認した.

6. 結 び

我々は Bluetooth の他局間干渉を低減するための方法として, 非同期式周波数ホッピングとなる異なるピコネット間の干渉に対して普遍同期方式の適用を提案した. そして, 普遍同期方式の適用による同期式周波数ホッピングの効果について, シミュレーションと実験による評価を行った. その結果, 同期式の平均ホッピング周波数衝突率は非同期式の半分となることを確認した.

次に普遍同期方式の適用後に生じる準同期状態について, 同期信号の発信源と各 Bluetooth 端末間における距離差等により発生する同期ずれの影響について検討した. シミュレーション結果より, 送信パケットを正しく受信するための同期ずれ許容量は, 完全に送受信タイミングが一致している場合を含む必要があることを確認した. また, 実験結果より環境雑音や他局間干渉において, SN 比の低下にともなう同期ずれ許容量の低下が確認されたが, Bluetooth 端末の持つ同期ずれ許容量は普遍同期方式の適用に十分な量であることを確認した.

今後は, 普遍同期方式の適用についてさらに具体的に検討し, 試作装置を用いた実働実験等を行う予定で

ある. さらに, Bluetooth ピコネット間のインタラクションのみで他局間干渉低減の効果が得られる方式についても検討を行っていきたい.

謝辞 本研究は文部科学省 21 世紀 COE プログラム「インテリジェント ヒューマンセンシング」の援助により行われた.

参 考 文 献

- 1) Dermawan, C. and Sugiura, A.: Simulation of Bluetooth Wireless Communication for ITS, *IEICE Trans. Comm.*, Vol.E86-B, No.1, pp.60-67 (2003).
- 2) 杉浦彰彦: Bluetooth の基礎技術と標準規格, トリケップス (2000).
- 3) 杉浦彰彦: Bluetooth 技術解説, ソフト・リサーチ・センター (2001).
- 4) 山岸俊之, 畠内孝明, 群 武治: ISM 帯無線 LAN を取り巻く干渉波とその補償方法に関する考察, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.101, No.26, pp.13-18 (2001).
- 5) Treister, B., Batra, A., Chen, K., Eliezer, O., et al.: *Adaptive Frequency Hopping: A Non-Collaborative Coexistence Mechanism*, IEEE P802.11 Working Group Contribution (2001).
- 6) Bluetooth SIG: *Specification of the Bluetooth System Ver1.1 Core*, Bluetooth SIG (2001).
- 7) Proakis, J.G.: *Digital Communications fourth edition*, McGraw-Hill Higher Education (2000).
- 8) Dixon, R.C.: *スペクトラム拡散通信方式*, ジャテック出版 (1978).
- 9) 三科正樹, 杉浦彰彦, 山下 誠: 普遍同期方式を利用する SS 双方向微弱電波通信の空き TV チャンネル帯域への適用, 電子情報通信学会論文誌, Vol.81-B-2, No.5, pp.508-514 (1998).
- 10) 中矢 猛, 杉浦彰彦: 周波数ホッピングを用いた各種近距離通信における干渉評価, 2001 年電子情報通信学会総合大会講演論文集, p. 723 (2001).
- 11) Kamerman, A.: Coexistence between Bluetooth and IEEE 802.11 CCK Solutions to avoid mutual interference, *IEEE 802.11-00/162* (2000).
- 12) Miyatsu, K.: Bluetooth Design Background and Its Technological Features, *IEICE Trans. Comm.*, Vol.E83-A, No.11, pp.2048-2053 (2000).
- 13) 宮津和弘: Bluetooth 技術解説ガイド, リックテレコム (2001).
- 14) Nakaya, T. and Sugiura, A.: Affect of gap with a packet transmission and receive timing in Bluetooth, *Proc. ITST2002*, pp.87-92 (2001).

(平成 15 年 3 月 28 日受付)

(平成 15 年 9 月 5 日採録)



中矢 猛 (学生会員)

2002年豊橋技術科学大学修士課程修了。現在、同大学大学院工学研究科博士後期課程在学中。スペクトル拡散, Bluetoothの研究に従事。電子情報通信学会会員。



杉浦 彰彦 (正会員)

1990年東京農工大学大学院工学研究科修士課程修了。同年豊田工業大学制御情報工学科助手。1998年豊橋技術科学大学大学院工学研究科知識情報工学系講師。1999年同助教授。工学博士。マルチメディア情報通信, スペクトル拡散通信, 符号分割多重接続, 携帯電話方式, デジタル放送方式, 動画像の高エネルギー符号化, 画像計測, 画像応用, WPAN基盤技術等の研究に従事。IEEE, 電子情報通信学会, 電気学会, 映像情報メディア学会各会員。
