

BluetoothとIEEE 802.11間の通信干渉に関する評価¹

† 鳩貝 耕一 †† 竹岳 五一

† 甲南大学 情報教育研究センター †† 甲南大学 理工学部 情報システム工学科
〒 658-8501 神戸市東灘区岡本8-9-1

† Tel: 078-435-2329 / E-mail: hatogai@konan-u.ac.jp

†† Tel: 078-435-2530 / E-mail: yue@konan-u.ac.jp

あらまし 2.4GHz帯無線LANにおいては、IEEE 802.11 (WLAN)とIEEE 802.15 (Bluetooth: WPAN)という異なる通信方式の規格が同居している。また、それぞれの規格に基づく製品が急速に普及しているため、双方が極めて近距離において同時に通信し相互に干渉することも十分考え得る。本学では、キャンパス内ほぼ全域にWLANを設置しているため、これら二つの通信が干渉しあい通信性能が低下したり、通信が不能になったりすることが懸念される。本論文では、近距離において二つの通信が干渉した際に双方にどのような影響が生ずるのかについて実際の機器を用いて検証し評価した。最初に通信干渉への双方の機器の距離依存性について評価し、次にWPANの周波数ホッピング領域をWLANのチャンネル1, 6, 10による通信で順に妨害していき、WLANの干渉チャンネル数に対するWPANの通信性能について評価した。その結果、片方がもう一方の通信性能に重大な影響を及ぼすことが明らかとなった。

キーワード: 無線LAN, Bluetooth, IEEE 802.11, IEEE 802.15, 分散ネットワーク環境, システム性能評価

Evaluation on Interference between Bluetooth and IEEE 802.11 Systems²

† Koichi Hatogai †† Wuyi Yue

† Education and Research Center for Information Science, Konan University

†† Department of Information and Systems Engineering, Konan University

8-9-1 Okamoto, Higashinada, Kobe 658-8501 JAPAN

† Tel: 078-435-2329 / E-mail: hatogai@konan-u.ac.jp

†† Tel: 078-435-2530 / E-mail: yue@konan-u.ac.jp

Abstract In 2.4GHz ISM band, there are two coexisting wireless communication standards: IEEE 802.11 (WLAN) and IEEE 802.15 (Bluetooth: WPAN). Since products based on these standards are spreading rapidly in the world, the one may interfere with the other when communicating simultaneously in the overlapped service areas. In Konan university, since over 180 WLAN access points have already been installed on the campus, Bluetooth may be used in these service areas. It is necessary to evaluate performance degradation of these systems when interfering. In this paper, first, we evaluate distance dependence of the communication performances while these systems interfering with each other. In the next, we evaluate the communication performances of Bluetooth when the number of interfering WLAN channels increases. In this experiment, frequency hopping range of Bluetooth is blocked in order by the WLAN communications with channels 1, 6, and 10. Significant performance degradations are observed in these experiments.

Key Words: Wireless LAN, FHSS, DSSS, Bluetooth, IEEE 802.11, IEEE 802.15, Multimedia Communication, Distributed Network Environment, Performance Evaluation.

¹本研究の一部は文部省科学研究補助費 (No.13650440) 及び甲南学園平生太郎基金科学研究奨励助成金によるものである。

²This research was supported in part by GRANT-IN-AID FOR SCIENTIFIC RESEARCH (No.13650440) and the Hirao Taro Foundation of the Konan University Association for Academic Research.

1. まえがき

IEEE 802.11 で規定される Wireless LAN (WLAN) システム [1]-[3] においては、伝送速度の高速化に伴う周波数資源の有効利用が重要な課題となってきた。ところが、無線通信の送信電力と受信電力の差は最大で 100 万倍ほどもあり、受信電力が送信電力に打ち消され衝突が検出できない。そのため、CSMA/CD 方式の特徴を生かした CSMA/CA 方式 (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance: 搬送波感知多重アクセス/衝突回避) 方式が提案されている [4]-[6]。

WLAN システム上のトラフィック特性に関する研究については、国内外を含めて研究が活発に行われつつある。WLAN を含むネットワーク環境の整備のためには、学習や教育に向けて WLAN システムの改良を行ったり、多くの利用者への高品位なサービスを提供したり、システムのスループットを改善したりするなどの対策が必要となってくる [7]-[10]。

WLAN の国際標準としては、IEEE 802.11 Wireless LAN Working Group を中心に標準化活動が活発に行われているが、最近になって IEEE 802.11 と同じ 2.4GHz 帯電波 (ISM バンド: Industrial, Scientific and Medical Band) を利用する標準規格として Bluetooth (IEEE 802.15) [11]-[13] が登場し普及しつつある。このため、IEEE 802.11 WLAN 機器との電波干渉が問題となってきた [14]-[15]。

IEEE 802.11 (WLAN) と IEEE 802.15 間の近距離における共存、協調問題については、IEEE 802.15 WPAN (Wireless Personal Area Network) TG2(Task Group 2) において、現在、様々なプロポーザルについて検討している段階である [16]。

甲南大学においても、IEEE 802.11 準拠アクセスポイント (NCR WavePOINT-II) を既に 180 箇所ほど設置し、IEEE 802.11b 準拠 PC カード (NCR WaveLAN IEEE Turbo) を備えたノートパソコンを数多くのユーザが使用している。従って、今後これらと Bluetooth 製品を同時利用する可能性が高くなってくるものと思われる。

本論文では、まず (1) FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) 方式を用いた Bluetooth の通信性能についての評価を行う。次に、(2) Bluetooth と WLAN との共存時における通信性能を測定し、性能低下に関する評価を行う。最後に、これらの評価をもとに今後どのような対策をたてていくべきかについて検討する。

2. WLAN と Bluetooth の通信仕様

以下に、IEEE 802.11 (WLAN) と IEEE 802.15 (WPAN) それぞれの仕様について示す。

2.1 IEEE 802.11 (WLAN)

WLAN システムとしては、NCR 社 WaveLAN IEEE Turbo を 100BASE-TX を有する有線 LAN 経由でパソコンに接続して実験を行った。本 WLAN ハードウェアは、IEEE 802.11 で標準化された DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) 方式通信において CSMA/CA プロトコルを採用している。WLAN システムの仕様について表 1 に示す。

表 1: WLAN (IEEE 802.11b) の仕様

項目	仕様
周波数帯	2401~2495MHz
チャンネル数	14 (実質 3~4)
転送速度	11Mbps (理論値)
通信方式	DSSS
アクセス制御方式	CSMA/CA

通信速度は最大 11Mbps であるが、11Mbps, 5Mbps, 2Mbps, 1Mbps の 4 段階に切り換え可能で、基地局とクライアント側アダプタの距離や電波状況により、適切な通信速度に自動的に速度を変更するフォールバック機能がある。もちろん、一定の通信速度に固定しておくことも可能である。

2.2 IEEE 802.15 (WPAN: Bluetooth)

ここでは、まず Bluetooth の仕様について表 2 に示しておく。

表 2: Bluetooth (IEEE 802.15) の仕様

項目	仕様
周波数帯	2402~2480MHz
通信方式	FHSS
ホッピング周波数	1MHz
周波数帯分割数	79
ホッピング時間間隔	625 μ s
変調方式	BFSK
プロトコル	Core Protocol (TDMA 方式)
最大通信速度	1Mbps

Bluetooth は日本における ISM バンド (2.4~2.5GHz)

のほぼ全域を使用しているが、WLANの1~14チャンネルすべての帯域で相互に影響しあう可能性があり、既存のIEEE 802.11WLAN設備への影響が懸念される。ちなみに、アマチュア無線の電波は1~9チャンネル前後にのみ影響を及ぼすものと考えられるので、電波強度に関する議論や雑音源としての電子レンジなどが発する電波を別にすればBluetoothからの影響がこのなかでは一番大きくなるものと思われる。

実験には富士通のBluetooth PCMCIAカード“FMV-JW281”を使用した。通信速度は非対称型通信時、約720Kbps、対称型通信時、約430Kbpsとなっている。出力は最大10dBmであり、通信距離は見通し約50mである。

3. 実験方法の概要

実験項目ごとに端末等機材を適当に配置してデータ通信を行い、それに要する時間を測定する。データ通信はサイズ約1Mバイト(1,100,288バイト)のファイルを送信側から受信側にコピーし、送信側で伝送開始から終了までの伝送時間を測定する。

実際には、これらの操作はツールを用いて行い、時間計測およびスループット計算もこの中で行っている。それぞれの通信性能に関する偏差を見るため、ファイルコピーを10回前後連続して行っている。

4. Bluetoothの通信性能

WLANを使用していない状態でBluetooth単体の基本性能を測定する。Bluetoothを実装した端末2台を対向配置して一方から他方へデータ伝送したときの所要時間からスループットを算出する。

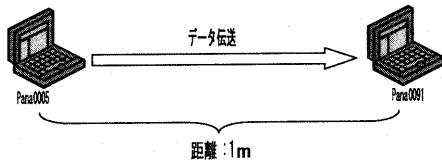


図1: Bluetoothの性能測定

端末間の距離は1mとし、12回のコピーを2度行い測定した。各回のスループットをグラフ化したものを次に示す。1度目、2度目とも性能のバラつきは無く、安定して通信できており、毎回320Kbps前後のスループットとなっている。

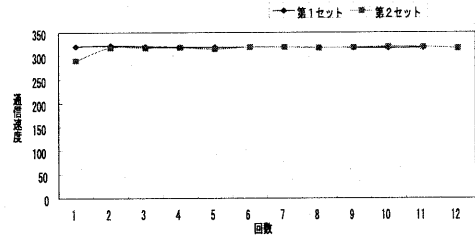


図2: Bluetoothの通信性能

5. 相互干渉時の通信性能

ここでは同じISMバンドを使用するWLANとBluetoothという2つの無線通信方式について、一方の電波が他方のデータ通信に及ぼす影響を検証し、このような環境下での利用指針を検討する上での基礎データを採取する。

実験は、大きく分けて以下の二つの項目について行った。

- 一对のBluetooth端末間で対向通信を行い、同時に一对のWLAN端末間でも対向通信を行う。それぞれの距離や配置を変化させ、通信性能を測定することで、双方にどのような影響が出るのかをみた。
- Bluetoothの周波数ホッピング帯域はISMバンドのほぼ全域を使用している。一方、WLANはISMバンドを14チャンネルに分けているが、直接拡散変調(DSSS)のため1つの通信で複数チャンネルを専有してしまう。よって、3~4チャンネルの通信によりISMバンド全体が専有されることになる。そこで、通信するWLAN数を1チャンネル、2チャンネル、3チャンネルと増やしていき、Bluetooth側の通信にどのような影響が出るのかについて実験した。

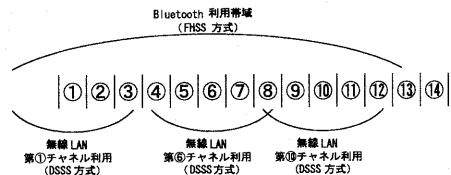


図3: BluetoothとWLANの周波数帯域

5.1 相互干渉の距離依存性

BluetoothとWLAN双方の稼動状態による通信性能について測定する。WLAN側の端末どうしは3m離し、

11Mbpsの設定で通信する。WLAN側が使用するチャネルは1つである。

Bluetooth側の状態は以下のようにいろいろと変えて測定し、双方のスループットに与える影響をみた。

1. 1台のBluetooth端末の電源を投入した状態で通信は行わない。
2. 2台のBluetooth端末を1m離して通信を行う。WLANの通信路とBluetoothの通信路は直交させる。
3. 2台のBluetooth端末を3m離して通信を行う。WLANの通信路とBluetoothの通信路を平行にし、それぞれの端末を極めて近接(数cm)させる。これは、同じパソコンにWLANとBluetoothの双方が搭載されることを想定した実験である。

5.1.1 1台のBluetooth電源を投入した場合

Bluetoothを実装した端末1台を起動(Bluetoothカードには通電しているが他端末とリンクは張っておらず、データ伝送も行っていない)状態で、対向配置したWLAN端末間において一方から他方へデータ伝送したときの所要時間からスループットを算出した。データ転送はファイルコピーを12回繰り返した。なお、Bluetooth端末は、WLANの通信路に対し垂直に50cm離して配置した。

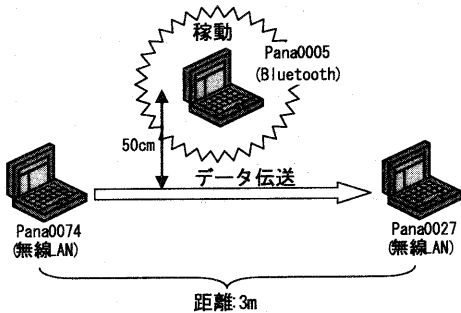


図4: 実験機器の配置(その1)

各回のスループットをグラフ化したものを図5に示す。

ほぼWLAN単体と同じスループット [17] が得られたことから、通電していてもリンクを張らずデータ通信もしていない状態では、WLANに対してBluetoothはノイズ源にはならないと考えられる。

WLAN端末間で上述と同様にデータ通信を行なっている最中に、Bluetooth端末にて「デバイス検索」(Bluetooth通信路を確立するため、他のBluetooth端

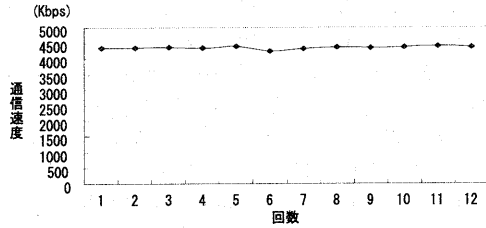


図5: 通信性能の時系列変化(その1a)

末を探すこと)を行なってみた、このときのWLAN側のスループットをグラフ化したものを図6に示す。

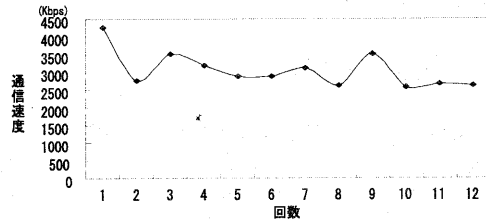


図6: 通信性能の時系列変化(その1b)

グラフはWLANデータ通信後しばらくしてからデバイス検索を行なった場合である。デバイス検索を行なわなかった場合は比較的安定(グラフが平ら)しているのに対し、デバイス検索を行なった場合は大きく乱高下していることがわかる。このことから、Bluetoothデバイス検索でWLANに対する不要電波が送出され、データ通信に影響を与えることがわかった。

5.1.2 通信路を直交させた場合

対向配置したWLAN端末間で一方から他方へデータ伝送すると同時に、Bluetooth端末間でも一方から他方へデータ伝送する場合において、それぞれのスループットを算出した。データ伝送の電波送出が互いの通信にどのように影響するのかについて調べる。

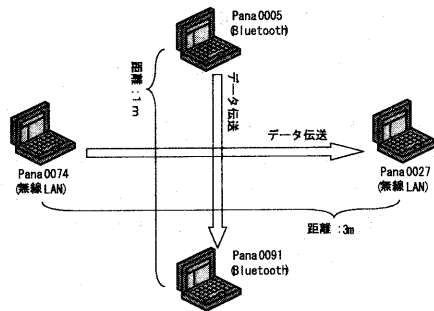


図7: 実験機器の配置(その2)

Bluetooth 端末間の距離は 1m であり、端末間 3m の WLAN 通信路と Bluetooth 通信路が直交するように配置した。Bluetooth 端末間では 12 回のコピーを繰り返す、WLAN 端末間では 120 回のコピーを繰り返した。

データ伝送各回の所要時間から算出したスループットを Bluetooth 側、WLAN 側合せてグラフ化したものを次に示す。

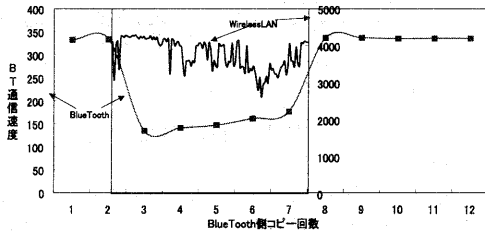


図 8: 通信性能の時系列変化 (その 2)

Bluetooth 側から見ると WLAN がノイズと見え、スループットが約半分に低下する。逆に、WLAN 側から見ると Bluetooth がノイズとして見え、スループットが低下するものの、Bluetooth ほどの低下率ではなく、平均して 80% に低下する程度である。高速で通信している WLAN では、競合全区間で均一に低下するわけではなく、スループットの変動が大きくなる。

5.1.3 通信路が平行で近接させた場合

異方式の通信源が近いほど他方への影響が大きくなるとの推定のもと、他方式端末を極端に近づけることで伝送速度が低下するかどうかを調べ、異種端末間の距離と伝送速度の関係について調べる。

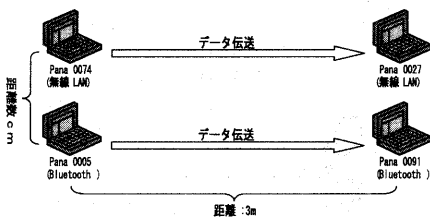


図 9: 実験機器の配置 (その 3)

WLAN 通信路と Bluetooth 通信路を平行で、間隔は数 cm になるよう配置する。端末間の距離はそれぞれ 3m である。Bluetooth 端末間では 12 回のコピーを繰り返す、WLAN 端末間では 1 セットで 120 回のコピーを行う。

Bluetooth 側は競合区間でスループットが半分 (150~200Kbps) 程度に下がったが、WLAN 側は競合区間において極端に通信速度が低下している。20 回中 1000Kbps

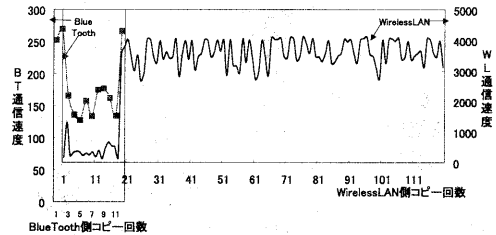


図 10: 通信性能の時系列変化 (その 3)

を超えたのは 1 回だけで他はすべて 1000Kbps を切っている (平均 400Kbps 強、最低値 112Kbps)。この実験では WLAN 側のコピー 1 回あたりのスループットが極端に低下したことにより、Bluetooth 側伝送終了時での WLAN 側のコピー回数が 20 回に減ってしまった。

この実験から、距離が近くなるほど異方式の通信がノイズとして大きく影響を与えることが明らかとなった。ただし、Bluetooth 側の影響は距離の大小にはあまり依存しないし、ノイズなしの通信速度との比 (約半分) をみても WLAN 側ほど影響がないことがわかった。

5.2 相互干渉の WLAN チャンネル数依存性

ここまでの実験では、WLAN が利用するチャンネルは 1 つのみであった。Bluetooth は ISM バンド全体で周波数ホッピング・スペクトラム拡散方式の通信を行っているため、周波数帯域の一部がノイズで使えなくても、それ以外の帯域にホッピングしたときには通信できるのでノイズに強いという特徴がある。

しかし、ホッピングする帯域全体にノイズがあった場合は、はたして通信できるかどうかは疑問である。この実験では、WLAN 側の使用チャンネルを 1 つから最大 3 つまで増やし、Bluetooth および WLAN 双方にどのような干渉が生じるのかについて実験を行った。

WLAN 側通信が 1 チャンネルの場合、Bluetooth 端末間では 12 回のコピーを繰り返す、WLAN 側では 120 回のコピーを行った。WLAN 側が 2 チャンネルの場合、Bluetooth 端末間では 9 回のコピー、WLAN では 1 セットで 120 回のコピーを、適当に間を空けて 2 度繰り返した。WLAN 側が 3 チャンネルの場合、Bluetooth 端末間では 12 回のコピー、WLAN では 240 回のコピーを適当に間を空けて 2 度繰り返した。

5.2.1 WLAN 側の通信が 1 チャンネルの場合

実験機器の構成について図 11 に示す。

Bluetooth 側が先にデータ伝送を開始し、4 回目の伝送を始めたところで WLAN 側のデータ伝送を開始した。Bluetooth 側が 9 回目伝送の途中で WLAN 側の伝

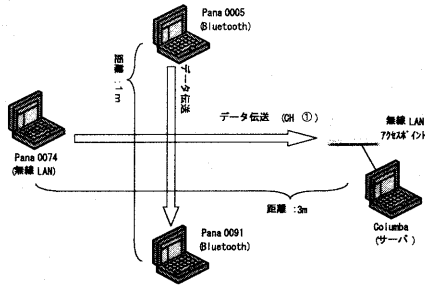


図 11: 実験機器の構成 (その 4)

送が完了した。

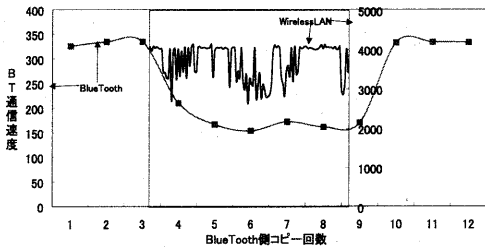


図 12: 通信性能の時系列変化 (その 4)

それぞれのスループットやグラフ上の相関は“5.1.2 通信路を直交させた場合”と同様の結果となった(競合区間で Bluetooth は半分 (150~200Kbps) 程度, WLAN のスループットは平均: 3709Kbps であった)。

5.2.2 WLAN 側の通信が 2 チャンルの場合

実験機器の構成について図 13 に示す。

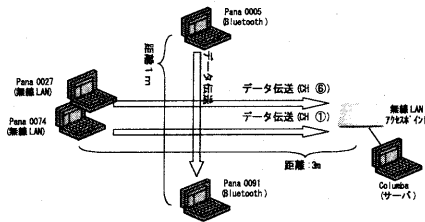


図 13: 実験機器の構成 (その 5)

Bluetooth 側が先にデータ伝送を開始し、2 回目の伝送を終了したところで WLAN の CH1, CH6 ともデータ伝送を開始する。Bluetooth 側が 4 回目伝送終了間際に WLAN の CH1 における 1 回目の転送が終了した。Bluetooth 側が 5 回目伝送終了間際に WLAN の CH6 における 1 回目の転送も終了した。

Bluetooth 側が 8 回目の伝送を終了したところで、ほぼ同時に WLAN CH1, CH6 とも 2 回目のデータ伝送を開始した。

Bluetooth, WLAN の CH1, CH6 それぞれについて、データ伝送各回の所要時間から算出したスループットをグラフ化したものを図 14 に示す。

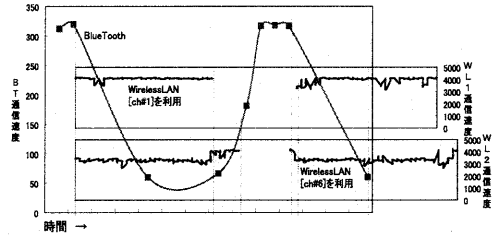


図 14: 通信性能の時系列変化 (その 5)

Bluetooth 側から見ると WLAN がノイズとして見え, WLAN 側が伝送し始めると Bluetooth 側スループットが急落し, 60Kbps 前後となった。この結果は WLAN 1 チャンルの干渉時における 160Kbps 程度のスループットをさらに大きく下回っている。これは Bluetooth が使用する帯域に占める WLAN 使用帯域の増大によって Bluetooth 側の通信できる領域が狭められ, 干渉がより激しくなったためと考えられる。

Bluetooth の伝送の有無にかかわらず, WLAN 側のスループットがほとんど変化しないことから, WLAN 側は Bluetooth の影響をほとんど受けていないように見える。帯域に占める WLAN 領域が大きくなったため, WLAN 側からの Bluetooth 側への影響が大きくなり, 逆に Bluetooth 側からの影響が無視できる程度になったためと考えられる。

5.2.3 WLAN 側の通信が 3 チャンルの場合

実験機器の構成について図 15 に示す。

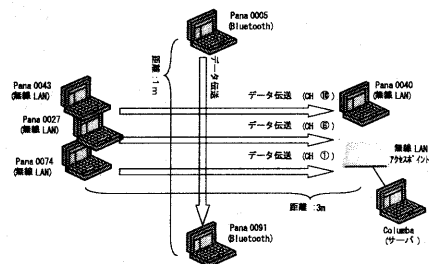


図 15: 実験機器の構成 (その 6)

Bluetooth 側が先にデータ伝送を開始し, Bluetooth 側が 2 回目の伝送を終了した時点で WLAN CH1, CH6, CH10 とも 1 回目のデータ伝送を開始した。Bluetooth 側が 6 回目伝送終了直前に WLAN の CH6 における 1 回目の転送が終了した。Bluetooth 側が 6 回目伝送終了直後に WLAN の CH1, CH10 の 1 回目の転送がほぼ

同時に終了した。

Bluetooth側が7回目の伝送を終了したところで、ほぼ同時にWLAN CH1, CH6, CH10とも2回目のデータ伝送を開始した。Bluetooth側が10回目伝送終了間際にWLAN CH1の転送が終了した。Bluetooth側が11回目伝送終了直前にWLAN CH6, CH10の2回目の転送が終了した。

Bluetooth, WLAN CH1, CH6, CH10それぞれについて、データ伝送各回の所要時間から算出したスループットをグラフ化したものを示す。

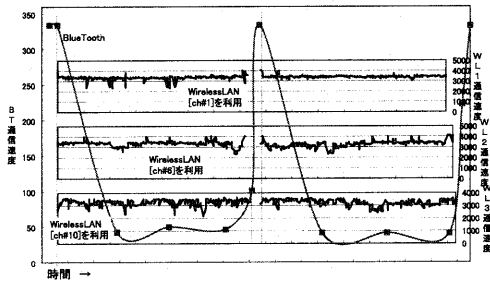


図 16: 通信性能の時系列変化 (その 6)

WLAN側が伝送し始めるとBluetooth側スループットが急落し、3チャンネルが同時稼働しているときは40Kbps前後となった。2チャンネル同時稼働の時の60Kbps程度をさらに下回っている。

6. 評価

実験結果より判ったWLANとBluetooth同時利用時の問題点や課題についてまとめる。

- 同じ帯域で双方を使う以上は必ず干渉が発生し、単独の使用に比べて幾らかでもスループットが低下することは確実である。よって、可能ならばBluetoothとWLANを同一機器上で同時に使用することは避けた方がよい。
- Bluetooth実装端末とWLAN実装端末を同時に使用した場合、お互いの距離が小さいほど、他がノイズとして大きく影響するのでスループットが下がる。
- 距離が隣接した場合、スループットの低下度合いが大きいのはWLANの方である。近接するだけならば、Bluetoothは通常時の半分程度(320Kbps → 130Kbps)にしか下がらないが、WLANは最悪では数十分の一(4.3Mbps → 110Kbps)まで下がる。WLANでの使用感としてはほとんどネットワークが切れたような感じを受けることになる

ため、電波干渉に関する技術的な回避策が必要となる。

- Bluetoothでの通信を確保するためにはWLANが多チャンネルで運用されている場所は避けるべきである。同時に多数のWLAN端末との通信を確立するためにチャンネルを違えて複数のWLAN基地局を設置している場所(例えば大講義室等)では帯域のほぼ全体がWLANで占められる可能性が高いので、このような場所でWLAN端末とBluetooth端末を同時に運用すると、Bluetooth端末側で大幅なスループット低下が起こると考えられる。
- WLANのアクセス方式には、通常CSMA/CA方式が用いられるので、通信方式の違うBluetoothなどでもいずれかの端末が搬送波を出していれば、別の端末は通信中のデータブロック転送の完了を待つはずである。しかしながら、同種機器の搬送波のみを検知するようなくみになっている場合には、キャリアセンスの機構自体が働かないことも考えられる。このような場合、Bluetoothは電子レンジのような無秩序に電波を放射する雑音源とあまりかわらない存在となってしまう。
- WLANの方は、あらかじめ設定をしない限りRTS/CTSのやりとりを行わない。通常はこちらの方が性能が良くなるのであるが、うまく通信できない場合、ソフトウェア(TCP/IPスタック)で再送を行わねばならず、性能低下が著しくなったものと考えられる。RTS/CTSをオンにした場合の通信特性については検証が必要である。

7. おわりに

本論文では、(1) Bluetoothの基本性能に関する通信特性についての評価を行った。(2) BluetoothとWaveLANとの共存時における通信性能を測定し、性能低下に関する評価を行った。

本学におけるWLAN通信システムでは、これまでテキスト、静止画を中心に処理の対象として扱ってきたが、システム性能の向上に伴い、動画映像データなどを含むマルチメディア通信が可能となってきた。このような環境下においては、手軽に利用できるISMバンドを用いて通信する様々な機器が同一空間内に混在する可能性が大きくなっていく。これらが相互に影響しあい、個々機器が本来持っている性能が十分に発揮できなくなることが容易に懸念される。

これら通信への影響について、WLANとBluetoothが近距離に混在している環境において、様々な条件下

でのシミュレーションを行い、通信の際のどのフェーズに問題があるのかについても明確にしていく予定である。このシミュレーションから得た結論をもとに本学における回避策を検討していきたい。

謝辞

本研究の実施にあたって、計画から実験、データ収集まで協力頂いた阿部知徳さんをはじめとする三菱電機(株)のスタッフに感謝いたします。さらに、実験に協力して下さった本大学の教員、学生みなさんに感謝いたします。

参考文献

- [1] P. T. Davis and C. R. McGuffin, "Wireless Local Area Networks," McGraw-Hill, pp.85-115, 1994.
- [2] B. P. Crow, I. Widjaja, J. G. Kim, and P. T. Sakai, "IEEE 802.11 Wireless Local Area Networks," IEEE Communications Magazine, Vol.35, No.9, pp.116-126, 1997.
- [3] "Information technology—Telecommunications and information exchange between systems—Local and metropolitan area networks—Specific requirements—Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications," ISO/IEC 8802-11 (IEEE Std 802.11), 1999.
- [4] J. L. Sobrinho and A. S. Krishnakumar, "Distributed Multiple Access Procedures to Provide Voice Communications over IEEE 802.11 Wireless Networks," Proc. of GLOBECOM'96, pp.1689-1694, 1996.
- [5] J. Deng and R. Shiung Chang, "A Priority Scheme for IEEE 802.11 DCF Access Method," IEICE Transactions on Communications, Vol.E82-B, No.1, pp.96-102, 1999.
- [6] 岳 五一, 松本 豊, "スロット付き CSMA/CA 無線 LAN システムの性能解析", 信学技報, 電子情報通信学会, Vol.99, No.272, pp.74, 1999.
- [7] 通信・放送機構, "平成 9 年度 甲南大学マルチメディア・モデルキャンパス展開事業成果報告書", 平成 10 年 5 月.
- [8] 通信・放送機構, "平成 10 年度 甲南大学マルチメディア・モデルキャンパス展開事業成果報告書", 平成 11 年 5 月.
- [9] 通信・放送機構, "平成 11 年度 甲南大学マルチメディア・モデルキャンパス展開事業成果報告書", 平成 12 年 5 月.
- [10] 通信・放送機構, "平成 12 年度 甲南大学マルチメディア・モデルキャンパス展開事業成果報告書", 平成 13 年 5 月.
- [11] "Specification of the Bluetooth System Version 1.0B," Bluetooth SIG, 1999.
- [12] 宮津 和弘, "Bluetooth ガイドブック", 日刊工業新聞社, 2000.
- [13] モバイルコンピューティング推進コンソーシアム, "明快 Bluetooth", リックテレコム, 2000.
- [14] "相互干渉への不安がのぞく悩みつきない Bluetooth", 日経エレクトロニクス 2000 年 11-6 号, pp.35, 日経 BP 社
- [15] "普及期に入った無線 LAN 技術 速度倍増や音声統合へと向かう", 日経バイト 2000 年 11 月号, pp.24, 日経 BP 社
- [16] <http://grouper.ieee.org/groups/802/15/index.html>
- [17] 鳩貝 耕一, 岳 五一, "室内における異方式無線 LAN 混在時の通信性能に関する評価", 社団法人パーソナルコンピュータユーザ利用技術協会論文誌, 社団法人パーソナルコンピュータユーザ利用技術協会, Vol.11, No.1, pp.75-82, 2001.