

指向性アンテナを用いた全二重無線通信のための ルーティングプロトコル

加藤 克洋¹ 萬代 雅希²

概要：近年、全二重無線通信が注目されている。全二重無線通信とは同一周波数で送受信を同時に行う技術である。これまでに指向性アンテナを用いた全二重無線通信のためのノードアーキテクチャが考案されている。特定の方向のみ大きなアンテナゲインをもつ指向性アンテナを用いることで、通信相手以外との干渉を減らすことができる。また、このノードアーキテクチャの特徴は単一トラフィックフローの場合、送信元ノードと宛先ノード間のホップ数が増加してもスループットの減少が小さい点である。しかし、複数のトラフィックフローが存在する場合、隠れ端末問題により、スループットの性能が劣化する。本論文はマルチホップネットワークにおける指向性アンテナを用いた全二重無線通信のためのルーティングプロトコルを提案する。提案方式は、トラフィックフローが交わらないように迂回させて経路を構築することで隠れ端末問題を低減し、スループットの向上を図る。

Routing Protocol for Directional Antenna and Full-Duplex Wireless

KATSUHIRO KATO¹ MASAKI BANDAI²

1. 緒論

近年、全二重無線通信が注目されている [1]-[3]。全二重無線通信とは同一周波数で送受信を同時に行う技術である。送受信を同時に行えることでスループットの向上が期待できる。しかし、マルチホップネットワークに全二重無線通信を単に適用するだけでは、スループットは向上しない。これは、無指向性アンテナを用いるために空間利用効率が制限されるからである。[4]ではマルチホップ時のスループットの向上のために指向性アンテナを用いた全二重無線通信のためのノードアーキテクチャを提案している。特定の方向のみ大きなアンテナゲインをもつ指向性アンテナを用いることで、通信相手以外への干渉を減らすことができる。また、このノードアーキテクチャの特徴は単一トラフィックフローの場合、送信元ノードと宛先ノード間のホップ数が増加してもスループットの減少が小さい点である。しかし、複数のトラフィックフローがあるマルチホッ

プネットワークでは、このノードアーキテクチャを用いた場合、隠れ端末問題が発生する可能性があり、スループット性能が劣化することが予想される。従って、複数のトラフィックフローがあるネットワークで、このノードアーキテクチャの性能を定量的に評価し、その性能を向上する手法が必要である。

本論文ではマルチホップネットワークにおける指向性アンテナを用いた全二重無線通信のためのルーティングプロトコルを提案する。提案方式では、トラフィックフローが交わらないように迂回させて経路を構築することで隠れ端末問題を低減し、スループットの向上を図る。性能評価では提案方式をネットワークシミュレータ ns-3 に実装し、マルチホップネットワークにおいて、スループットが向上することを確認する。

本論文の構成は以下の通りである。2節では関連研究として、指向性アンテナを用いた全二重無線通信のためのノードアーキテクチャ、および MAC(Media Access Control) プロトコルを示す。3節ではマルチホップネットワークにおける指向性アンテナを用いた全二重無線通信のためのルーティングプロトコルを提案する。4節ではネットワー

¹ 上智大学大学院 理工学研究科
102-8554 東京都千代田区紀尾井町 7-1

² 上智大学 理工学部 情報理工学科
102-8554 東京都千代田区紀尾井町 7-1

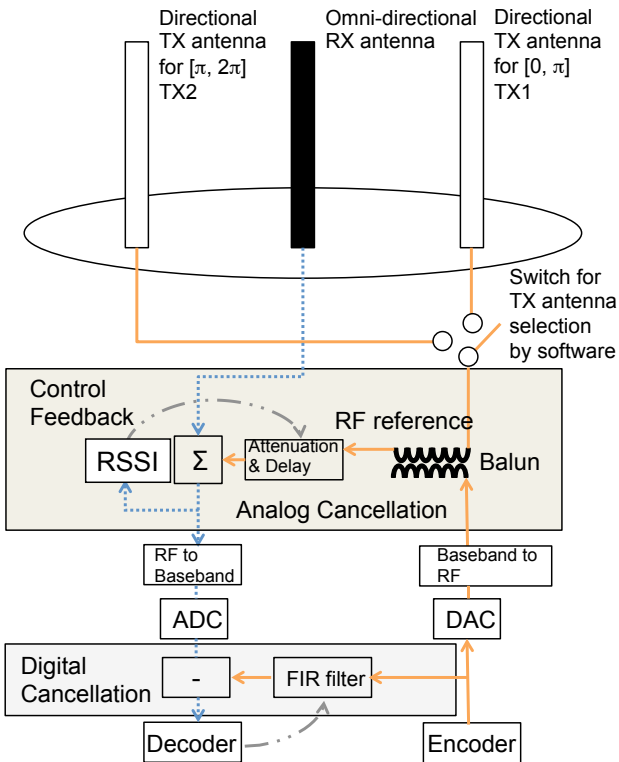


図 1 指向性アンテナを用いた全二重無線通信のためのノードアーキテクチャ

クシミュレータにより、提案ルーティングプロトコルを評価し、考察する。最後に、5 節でむすびとする。

2. 関連研究

指向性アンテナを用いた全二重無線通信のためのノードアーキテクチャと MAC プロトコルを示す。最初にノードアーキテクチャについて説明する。このノードアーキテクチャを用いることによって、指向性の全二重無線通信を行うことが可能になる。次に指向性アンテナを用いた全二重無線通信のための MAC プロトコルについて説明する。

2.1 指向性アンテナを用いた全二重無線通信のためのノードアーキテクチャ

指向性アンテナを用いた全二重無線通信のノードアーキテクチャ [4] は送信用の N_{ant} 本の指向性アンテナと受信用の 1 本の無指向性アンテナ RX を用いる。図 1 に $N_{ant} = 2$ のときの指向性アンテナを用いた全二重無線通信のためのノードアーキテクチャを示す。送信用アンテナ TX1, 送信用アンテナ TX2 を受信用の無指向性アンテナの周囲に配置する。送信用アンテナ TX1 は 0 から π の範囲の送信に使われる。送信用アンテナ TX2 は π から 2π の範囲の送信に使われる。それぞれの送信用アンテナはソフトウェアによって制御されるスイッチによって接続され、送信用アンテナ TX1 と送信用アンテナ TX2 は同時使うことはできない。それによって、ノードは次の 2 種類の動作をする。

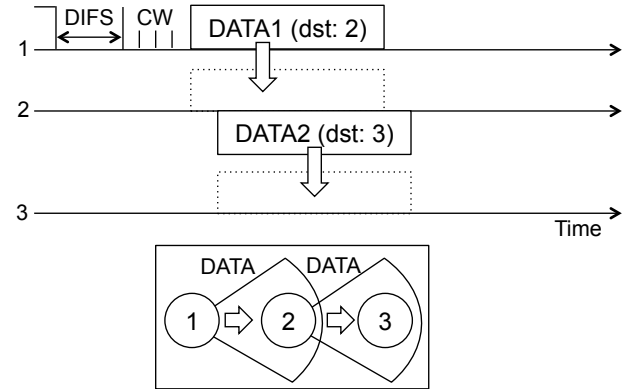


図 2 指向性アンテナを用いた全二重無線通信のための MAC プロトコル

- TX1 で指向性で送信しながら RX で無指向性で受信
 - TX2 で指向性で送信しながら RX で無指向性で受信
- このノードアーキテクチャは指向性アンテナの数に関わらず、一組のデジタルキャンセル回路とアナログキャンセル回路で構成できる。本研究ではこのノードアーキテクチャを用いる。

2.2 指向性アンテナを用いた全二重無線通信のための MAC プロトコル

指向性アンテナを用いた全二重無線通信のための MAC プロトコル [4] は CSMA/CA を基本とする。この MAC プロトコルは以下の二つの修正点がある。

- データ送信の条件を変更
- ACK フレームを取り除くこと

一つ目の修正点は指向性アンテナを用いた全二重無線通信のためにデータ送信の条件を変更することである。CSMA/CA は半二重無線通信のためのプロトコルである。そのため、ノードはキャリアを検出したときにデータ送信を禁止されるので、全二重無線通信を行うことができない。そこで、指向性アンテナを用いた全二重無線通信のための MAC プロトコルは、受信しているデータの宛先 MAC アドレスが自分宛だった場合、送信を許可する。図 2 に指向性アンテナを用いた全二重無線通信のための MAC プロトコルの動作例を示す。図 2 は 3 ノードのライントポロジを仮定している。ノード 1 からノード 3 は電波が届かないとする。ノード 1 は DIFS 時間とコンテンションウィンドウ時間待ち、ノード 2 にデータ送信を開始する。ノード 2 はフレームを受信し始めた時、受信しているデータの宛先 MAC アドレスがノード 2 自身である場合、ノード 2 はノード 3 にデータ送信をすることを許可する。

二つ目の修正点は、ACK フレームを取り除くことである。図 2 の場合、ノード 2 がデータを受信し終わった後にノード 3 が ACK フレームを送った場合、ACK フレームはノード 1 からのデータとノード 2 で衝突が発生するため、ACK フレームを取り除く。

[4]が提案するMACプロトコルはコンテンションウィンドウを取り除いている。そのため、ライントポロジで双方向通信を行った場合、フレームの衝突が多発する。そこで、本論文では双方向通信が行われるマルチホップネットワークにおいて、フレームの衝突を減らすためにCSMA/CAと同様にコンテンションウィンドウを使用した。

3. 提案方式

本論文ではマルチホップネットワークにおける指向性アンテナを用いた全二重無線通信のためのルーティングプロトコルを提案する。提案方式はトラフィックフローが交わらないように、迂回させて経路を構築する手法である。提案方式では迂回して経路を構築し、隠れ端末問題を引き起こすトラフィックフローの交わりを回避することで、スループットの向上を図る。

提案方式はオンデマンド型のルーティングプロトコルでAODV(Ad hoc On-Demand Distance Vector)に以下の三つの機能を付加したものである。

- 機能1
宛先ノードからのRREP(Route-Reply)の送信数とRREP受信ノードのRREPの受信数を数えるカウンタを持つ
- 機能2
RREQ(Route-Request)のヘッダにカウンタ値を書き込むフィールド(カウンタフィールド)を追加
- 機能3
宛先ノードで最大 M 個のRREQの受信を待つ
カウンタとカウンタフィールドの初期値は0とする。提案するルーティングプロトコルの動作を以下に示す。
 - (1) 送信元ノードは経路を見つけるためにRREQをネットワークへブロードキャスト
 - (2) 各中継ノードは自身の持つカウンタの値をRREQのヘッダのカウンタフィールドの値に加算し、RREQを再送信
 - (3) 宛先ノードはカウンタフィールドが0であるRREQを受信したら送信元ノードへユニキャストでRREPを返信する。宛先ノードはカウンタフィールドが0のRREQを受信するまで M 個待つ。カウンタフィールドの値が0のRREQを受信しない場合、 M 番目に受信したRREQに対してRREPを送信
 - (4) 宛先ノードからのRREPの送信または各中継ノードがRREPを受信したノードのカウンタの値を1増加
 - (5) RREPが送信元ノードに到達したら、送信元ノードは宛先ノードにデータ送信を開始

なお、通信に用いているエントリがルーティングテーブルから削除された場合に、カウンタの値を1減少させる。

提案方式の動作例を図3に示す。図3はノード4から5へのトラフィックフローがあることを仮定し、 $M=3$ の時

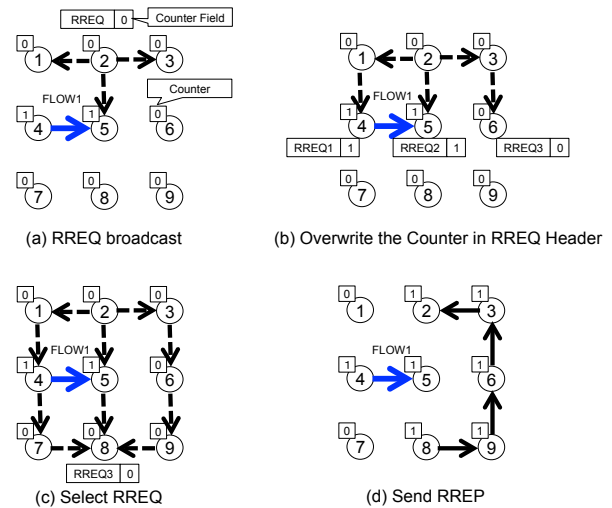


図3 提案方式の動作例

の提案方式の動作例を示す。ノード2は8までの経路が必要になり、RREQをブロードキャストする(図3a)。各中継ノードは自身の持つカウンタの値をRREQのヘッダのカウンタフィールドの値と加算し、RREQを再ブロードキャストする(図3b)。ノード8に到着したそれぞれのRREQは以下ようになる。

- RREQ1
経路：ノード2 → 1 → 4 → 7 → 8
カウンタフィールドの値：1 (0+0+1+0)
- RREQ2
経路：ノード2 → 5 → 8
カウンタフィールドの値：1 (0+1)
- RREQ3
経路：ノード2 → 3 → 6 → 9 → 8
カウンタフィールドの値：0 (0+0+0+0)

RREQ2, RREQ1, RREQ3の順でノード8に到着すると仮定する。ノード8はカウンタの値が1であるRREQ1, 2は破棄する。ノード8はカウンタのフィールドの値が0であるRREQ3の来た経路の逆(8 → 9 → 6 → 3 → 2)に沿って、RREPを送信する(図3c)。ノード8はRREPを送信する際に自身のカウンタの値を1上げる。RREPの受信ノードであるノード2, 3, 6, 9もまたカウンタの値を1増加させる(図3d)。ノード2がRREPを受信すると、ノード2と8の間でデータ送信を開始する。

提案方式を用いることで複数のトラフィックフローが交わらず、隠れ端末問題を低減できる。一方、提案方式を用いて迂回して経路を構築することにより、ホップ数の増加によるスループットの減少が懸念される。しかし、指向性アンテナを用いた全二重無線通信のためのノードアーキテクチャは単一トラフィックフローの場合ホップ数が増加してもスループットの減少が小さいという特徴がある[4]。これは指向性アンテナを用いることで通信相手以外との干渉が低減し、空間利用効率が上がり、全二重無線通信を行うことで時間効率が向上するためである。この特徴から指

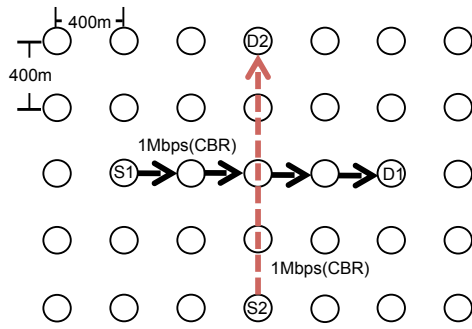


図4 格子状トポロジ

向性アンテナを用いた全二重無線通信のためのノードアーキテクチャを用いることで、ホップ数の増加によるスループットの減少の問題は改善される。

4. 性能評価

4.1 評価環境

マルチホップネットワークにおいて指向性アンテナを用いた全二重無線通信のための提案ルーティングプロトコルの性能評価を行う。評価を行うために、指向性アンテナを用いた全二重無線通信のためのノードアーキテクチャおよびMACプロトコルをネットワークシミュレータ ns-3[5] 上に実装する。

図4はシミュレーションで用いる5×7の格子状トポロジを示す。各ノードは近隣ノードとは通信可能だが、対角にあるノードとは通信を行うことができない。また、ノードS1からノードD2へのトラフィックフローがあることを仮定する。ここではルーティングプロトコルを用いることによって、ノードS2がノードD2への経路をどのように作成するかを調べる。評価で用いるシミュレーションパラメータを表1に示す。また、以下のことを仮定する。

- 1 Mbps の固定ビットレート (CBR) でノード S1, S2 からノード D1, D2 へのパケットが発生
- すべてのノードは指向性アンテナを用いた全二重無線通信のためのノードアーキテクチャを使用
- 送信距離およびキャリアセンスの範囲は 443m
- シミュレーションを 20 回行い、各トラフィックフローのエンドツーエンドの平均スループットを評価
- 指向性アンテナのビーム幅は 30°
- 比較対象には AODV を使用

提案方式は宛先ノードで RREQ の受信を待つ最大数 M を 2, 3, 4, 5 に設定する。

4.2 評価結果

図5にエンドツーエンドの平均スループットを示す。提案方式のスループットは全ての場合において、AODV のスループットを上回ることがわかる。これは、提案方式を用いることにより、トラフィックフローが交わらずに経路

表1 シミュレーションパラメータ

Parameter	Value
シミュレーション時間	100 seconds
パケットサイズ	1,500 byte
チャンネルレート	1 Mb/s
キャリア周波数	2.4 GHz
通信規格	IEEE 802.11b
フレーム受信モデル	SINR-based model [6]

が構築されたことで、隠れ端末問題が低減するからである。一方、AODVはトラフィックフローが交わるノードで隠れ端末問題が発生する。その結果、トラフィックフローが交わるノードでデータの衝突が発生し、スループットが劣化する。さらに、 $M=5$ の提案方式はAODVと比較して、86.4%のスループットが改善されることがわかる。これは M の値が増大するにつれて、カウンタフィールドの値が0のRREQを受信する確率が上がるためである。つまり、迂回して経路を構築する確率が上昇するということである。

図6にノードS2とD2間の平均ホップ数を示す。図6から、提案方式はすべての場合において、AODVよりもホップ数が多い。また同様に、 M の値を増やすにつれて、ホップ数が増加することがわかる。これは提案方式を用いることにより、迂回して経路を構築することが原因である。しかし、スループットの観点から、ホップ数が増加することは、提案方式の問題にはならない。これは、指向性アンテナを用いた全二重無線通信は送信元ノードと宛先ノード間のホップ数が増加しても、スループットの減少が小さいという特徴があるためである[4]。指向性アンテナを用いた全二重無線通信のためのノードアーキテクチャにおいて、ホップ数の増加によるスループット減少の問題は改善される。

図7に経路構築遅延を示す。経路構築遅延は送信元ノードがRREQを送信してからRREPを受信するまでの時間と定義する。 $M=5$ のとき、提案方式は他の評価モデルと比較して、最も経路構築遅延が大きいがわかる。これは二つの理由がある。一つ目の理由は、RREQの受信を最大 M 個待つことによる遅延である、二つ目の理由は、RREPが迂回経路を通り転送される遅延である。一方で、AODVは最も経路選択遅延が小さい。これはAODVは宛先ノードはRREQを受信すると、すぐにRREPを送信するからである。

これらの結果から、提案方式は優れている点と問題点があるがわかった。優れている点として、提案方式はマルチホップネットワークにおいて隠れ端末問題を軽減することができ、スループットを向上することができる。問題点として、提案方式は経路構築遅延が大きくなることである。以上より、提案方式を用いる場合、これら二つのことを考慮し、 M の値を選択することが重要になる。

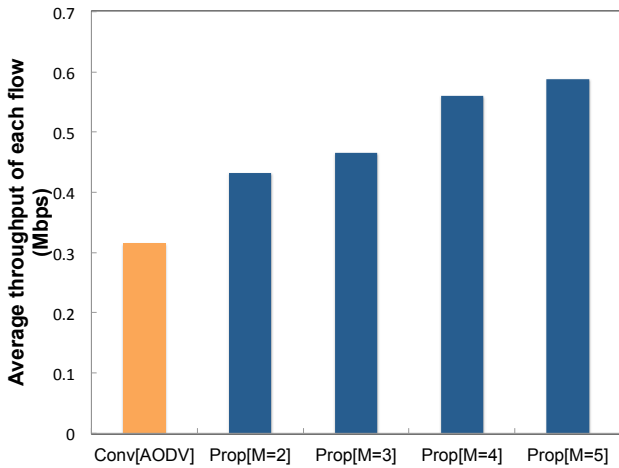


図 5 各フローの平均スループット

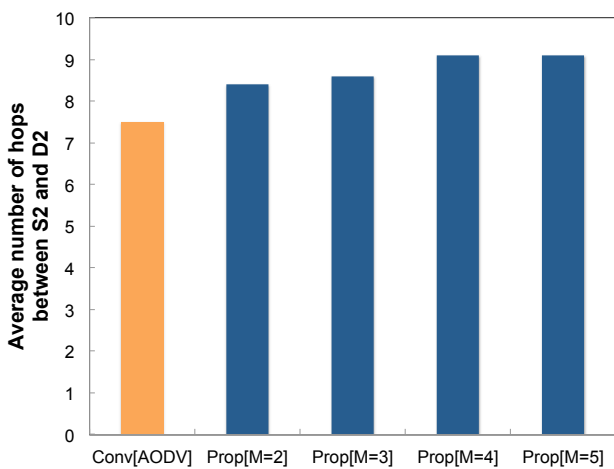


図 6 ノード S2 とノード D2 間の平均ホップ数

4.3 考察

シミュレーション結果より、提案ルーティングプロトコルは AODV と比較し、86.4% スループットが向上した。提案方式は、宛先ノードで RREQ の受信を待つ最大数 M の値を大きくするとスループットが向上する傾向がある。これは、迂回して経路を構築する可能性が上がり、隠れ端末問題が低減するためである。しかし、多くのトラフィックフローがあるマルチホップネットワークの場合、迂回経路を発見することができず、提案方式を用いてもスループット向上は大きくないと考える。そのため、提案方式はトラフィックフローが少ないマルチホップネットワークで用いることで、スループット向上が期待できる。

5. 結論

本論文では、マルチホップネットワークにおける指向性アンテナを用いた全二重無線通信のためのルーティングプロトコルを提案した。提案方式は、迂回して経路を構築することによって隠れ端末問題を低減する。また、指向性アンテナを用いた全二重無線通信のためのノードアーキテクチャは単一トラフィックフローの場合、ホップ数が増加し

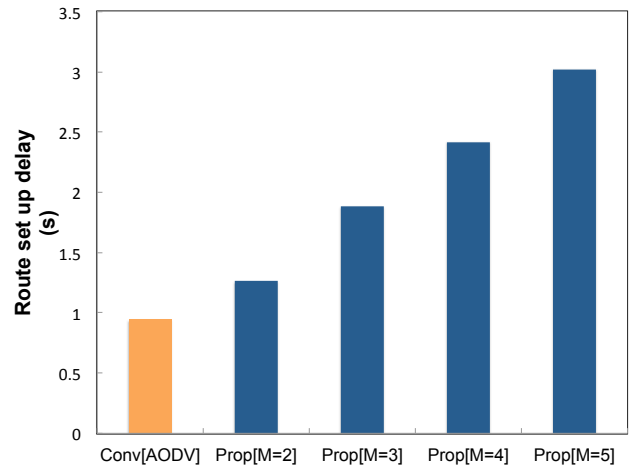


図 7 経路構築遅延

てもスループットの減少が小さいという特徴がある。つまり、提案方式を用いることによるホップ数の増加によるスループットの減少の問題はこのノードアーキテクチャを用いることで改善される。性能評価ではネットワークシミュレータ ns-3 上に提案方式を実装した。性能評価より、提案方式は AODV よりも 86.4% のスループットの向上を確認した。今後の課題として WARP v3 のようなソフトウェア無線テストベッド上に指向性アンテナを用いた全二重無線通信を実装して、定量的な評価を行う。

謝辞

本研究は文部科学省の科学研究費補助金(若手研究(B) 24700074 および基盤研究(A) 24240009)、電気通信普及財団の支援より実施された。

参考文献

- [1] J. Choi, M. Jain, J. Choi, K. Srinivasan, P. Levis and S. Katti, "Achieving single channel, full duplex wireless communication," Proc. of *ACM MobiCom'10*, pp. 1-12, 2010.
- [2] M. Jain, J. Choi, T.T. Kim, D. Bharadia, S. Seth, K. Srinivasan, P. Levis, S. Katti and P. Sinha, "Practical, real-time, full duplex wireless," Proc. of *ACM MobiCom'11*, pp. 300-312, Sep. 2011.
- [3] S. Hong, J. Mehlman and S. Katti, "Picasso: Flexible RF and spectrum slicing," Proc. of *ACM SIGCOMM'12*, pp. 37-48, Aug. 2012.
- [4] K. Miura and M. Bandai, "Node architecture and MAC protocol for full-duplex wireless and directional antennas," Proc. of *IEEE PIMRC'12*, pp. 385-390, Sep. 2012.
- [5] Network Simulator ns-3 <http://www.nsnam.org/>
- [6] M. Lacage and T.R. Henderson, "Yet another network simulator," Proc. of *ACM WNS2'06*, 2006.
- [7] M. Takata, M. Bandai and T. Watanabe, "A MAC protocol with directional antennas for deafness avoidance in ad hoc networks," Proc. of *IEEE GLOBECOM'07*, pp. 620-625, 2007.
- [8] M. Takata, M. Bandai and T. Watanabe, "A receiver-initiated directional MAC protocol for handling deafness in ad hoc networks," Proc. of *IEEE ICC'06*, pp. 4089-4095, 2006.