

センサネットワークにおけるリアルタイム音声通信

鈴木 亮平[†] ラフル・マングハラム[‡] アンソニー・ロウエ[‡]
戸辺 義人[§] ラジ・ラジクマー[‡]

[†]東京電機大学大学院 工学研究科 情報メディア学専攻

[§]東京電機大学 工学部 情報メディア学科, 独立行政法人科学技術振興機構 CREST

[‡]カーネギーメロン大学 Electrical and Computer Engineering

^{†§}{ryohei, yoshito}@unl.im.dendai.ac.jp, [‡]{rahulm, agr, raj}@ece.cmu.edu

あらまし 従来センサネットワークでは秒単位またはそれ以上のサイクルでデータを収集するアプリケーションが考えられている。これはノードの消費電力を抑えバッテリーの寿命を延ばすために、処理のサイクルを長くしているためである。しかし侵入者検知や緊急時には、音声やビデオデータなどリアルタイムデータストリーミングを行う必要がある。そこで我々は FireFly として、時分割多重同期(TDMA)システムを利用したマルチホップ・リアルタイムデータ通信のためのプラットフォームの提案を行う。FireFly では低コストハードウェアとリアルタイム OS, MAC プロトコルによって、時刻同期からネットワークスケジューリングまでをサポートし、限られたリソースにおいてセンシングタスクと双方向リアルタイム音声通信の双方を可能とする。また米国での実験用炭鉱に 42 個のノードを配置し実験環境での実験を行いその結果を議論した。

キーワード センサネットワーク, 音声符号化, TDMA, リアルタイム通信

Real-time Voice Communication in Sensor Networks

Ryohei Suzuki[†] Rahul Mangharam[‡] Anthony Rowe[‡]
Yoshito Tobe[§] Raj Rajkumar[‡]

[†]Department of Information and Media Engineering, Tokyo Denki University

[§]Department of Information Systems and Multimedia Design, Tokyo Denki University,
CREST, Japan Science and Technology Agency

[‡]Electrical and Computer Engineering, Carnegie Mellon University

^{†§}{ryohei, yoshito}@unl.im.dendai.ac.jp, [‡]{rahulm, agr, raj}@ece.cmu.edu

Abstract Wireless sensor networks have traditionally focused on low duty-cycle applications where sensor data are reported periodically in the order of seconds or even longer. This is due to typical slow changes in physical variables, the need to keep node costs low and the goal of extending battery lifetime. However, there is a growing need to support real-time streaming of audio and/or low-rate video even in wireless sensor networks for use in emergency and short-term intruder detection. In this paper, we present FireFly, a time-synchronized sensor network platform for real-time data streaming across multiple hops. FireFly is composed of several integrated layers including specialized low-cost hardware, a sensor network operating system, a real-time link layer and network scheduling which together provide efficient support for applications with timeliness constraints. We use this platform to support 2-way audio streaming concurrently with sensing tasks. We also describe our experimental deployment of 42 nodes in a coal mine, and present measurements of the end-to-end throughput, jitter, packet loss and voice quality.

Keyword sensor networks, audio-codec, TDMA, Real-time communication

1. はじめに

無線センサネットワークではバッテリー駆動の無線センサノードによるマルチホップ無線通信によって、ゲートウェイや管理者の元にデータが配送される。これら無線センサネットワークではノードの電力消費を抑えるために、8bit または 16bit のマイクロコントローラを用い、短距離無線[1]を使ってノード間の通信を行ってきた。また電力消費を抑えるために、従来低周期のセンシングやモニタリングまたネットワーク内でのデータの集約等のアプリケーションが考えられてきた[2][3][4]。しかし、侵入者検知や火災検知など緊急を要する場合においては電力消費を抑えるだけでなく、データに対するリアルタイム性が求められる。特に転送すべきデータ

が音声や映像の場合、一時的な広帯域通信や遅延時間への制限を満たすための隣接ノード間での協調が必要となる。さらに双方向音声通信の場合、双方向におけるエンド・エンド間での遅延時間をバランスさせる必要がある。このような課題を解決するため本稿ではリアルタイム音声通信センサネットワークの基盤システムとして FireFly を提案する。FireFly において我々はハードウェアベースの時刻同期を行い、TDMA を基盤とした MAC プロトコル、リアルタイム OS、また音声通信のためのパケットスケジューリング方式を提案する。さらに米国試験用炭鉱において実験を行い、その結果を考察する。炭鉱での無線センサネットワークにおけるリアルタイム音声通信の必要性は 2006 年 1 月米国ウエストヴ

アーゼニア州 Sago 炭鉱での死亡事故からもわかる。Sago 炭鉱での事故では炭鉱内通路の崩落によって 12 名が死亡した。救助隊は崩壊によって閉じ込められた採掘者がどこにいるのか、また怪我人、炭鉱内酸素濃度などの状況を事故が起きて 2 日間にわたり知る事ができなかった。炭鉱での死亡者は米国では年間 40 名以上 (1995 年) になる。また中国においては年間 5000 人以上の人が死亡している。従来、炭鉱における崩壊事故では、広範囲にわたる閉鎖空間へ地上から穴を開けマイクروفオンや酸素濃度計などを投下する作業を繰り返していた。我々はこのような閉鎖された環境においてもネットワークを維持しリアルタイム音声通信を行う基盤システムを提案する。

本稿の構成は以下の通りである。第 2 章では本研究の関連研究を述べる。第 3 章では FireFly のプラットフォームを第 4 章ではリアルタイム音声通信についてそれぞれ述べる。第 5 章では、スケジューリングについて述べ、第 6 章で実験とその結果からの考察を述べ、最後に結論及び方向性を示す。

2. 関連研究

TRAMA[5]や LMAC[6]はタイムスロットで通信を行う TDMA プロトコルである。TRAMA は TDMA と CSMA を基盤とした通信の両方をサポートしている。LMAC では隠れ端末問題に対応するため、送信ノードの 2 ホップ以内に同じスロット番号が割り当てられないようにしている。FireFly ではコンテンションスロットに CSMA を用いるのではなく、CSMA よりも電力消費効率のよい Slotted-ALOHA を用いている。また FireFly では時刻同期をリンクプロトコルやハードウェアに統合している。ハードウェアによる時刻同期は実環境に配置した場合においても正確な時刻同期を保証する。8bit マイクロコントローラにおけるリアルタイム音声符号化は限られた処理能力、RAM、帯域において難しい課題である。PIC マイクロコントローラにおける ADPCM 復号化[7]やフラッシュメモリを使用した Atmel マイクロコントローラにおけるオフラインでの ADPCM 復号化[8]が提案されているが、我々はフラッシュメモリを利用することなく、オンラインでの符号化を可能とする。我々は FireFly においてハードウェアベースの時刻同期、リンク層プロトコル、タスクスケジューリング、また通信レートに適応させた音声圧縮の連携を行い、無線センサネットワークにおけるリアルタイム通信の新しい基盤システムを提供すると考える。

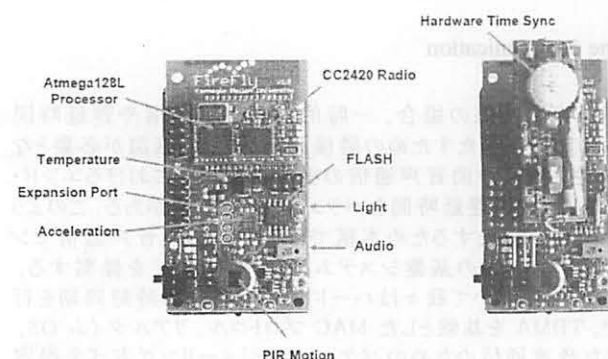


図 1 FireFly ハードウェア

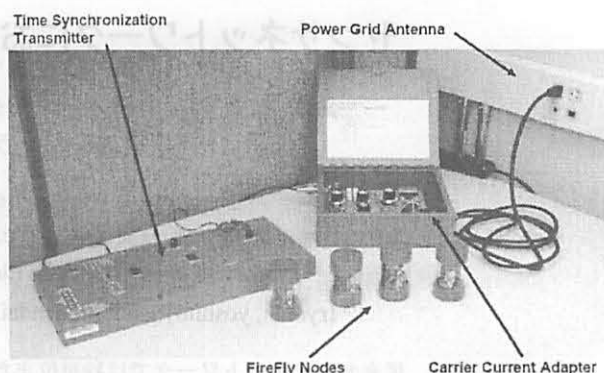


図 2 時刻同期ハードウェア

3. FireFly プラットフォーム

本章では FireFly のハードウェア、Nano-RK RTOS、RT-Link プロトコルについて述べる。

3.1. FireFly ハードウェア

我々は FireFly として時刻同期が可能なハードウェアを開発した。図 1 に FireFly を示す。FireFly では米国 Atmel 社の ATmega32[9]8bit のマイクロコントローラ、2Kbyte の RAM、32Kbyte の ROM を使用している。また Chipcon CC2420 を装備し、IEEE 802.15.4 規格での無線通信を行う。そのため、最大パケットサイズは 128bytes であり、最大データレートは 250Kbps となる。センサには照度、温度、赤外線モーションセンサを装備し、各センサの使用電力レベルを個々に調整することを可能にしている。さらに MEMS テクノロジーによる小型マイクروفオンを装備し、最大 8KHz でのサンプリングを行うことが可能である。

3.2. Nano-RK リアルタイム OS

我々は Nano-RK[10]においてマルチホップ無線ネットワークを考慮したリアルタイム OS を開発した。Nano-RK は複数タスクの実行期限を満たすため、固定優先度プリエンプティブマルチタスクをサポートしている。また、ネットワークのライフタイムを維持するため各センサでのタスクへの使用電力予約を行う。さらに、ネットワークスタック (3.3 章において詳しく述べる。) ではパケット転送や TDMA を基盤にしたネットワークスケジューリングをサポートする。

3.3. RT-Link プロトコル

RT-Link[11]はスループットや遅延時間、電力消費量の予測を必要とするネットワークのために設計を行った TDMA を基盤にしたリンク層プロトコルである。全てのパケットは割り当てられたタイムスロット内で通信を行う。全てのノードは時刻同期されており、環境に応じ、ハードウェアによる時刻同期とソフトウェアによる時刻同期を切り替える。

3.3.1. ハードウェアによる時刻同期

RT-Link では固定ノードとモバイルノードの 2 つのノードをサポートしている。固定ノードでは周期的に発信されるグローバル信号を受信し時刻同期を行っている。我々は屋内では AM/FM 時刻同期モジュールを利用し、屋外では原子時計受信器を用いる設計を行った。屋内では図 2 に示すよう

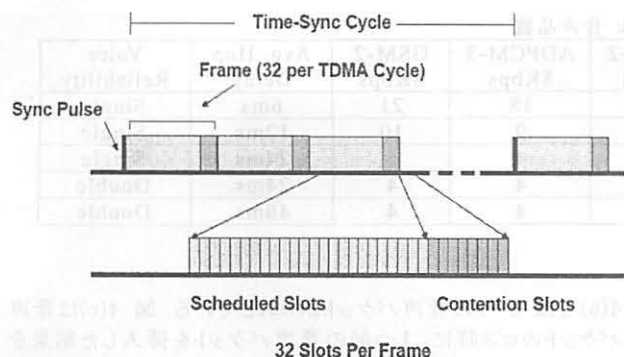


図3 TDMA スロット

に搬送式AM送信器を使用し、建物内の電力線をAMアンテナとして時刻同期信号を送信する。各ノードの時刻同期モジュールが時刻同期信号を検出するとマイクロコントローラへのトリガを生じる。図3に示すように、時刻同期パルスは各フレームの先頭部分を示し、パルスの受信によってフレームの開始タイミングが調整される。時刻同期のサイクルは32個のフレームで構成され、各フレームは32個の6msのスロットを保持している。各スロットは4msのパケット送受信に割り当てられた部分と2msのパケット集約や転送のための処理部分に分かれている。RT-Linkには割り当てられたスロットでのみ通信が可能なScheduled Slots(SS)とスロットを割り当てられていない新規ノードやモバイルノードのためのContention Slots(CS)の2種類のTDMAスロットがある。SSが割り当てられたノードはチャネルを独占し、干渉のない通信が可能となる。またRT-Linkプロトコルによる音声通信には最大112bytesのペイロード部分が利用できる。

3.3.2. ソフトウェアによる時刻同期

我々の提案するプラットフォームでは通常状態で低消費電力であるハードウェアによる時刻同期を選択するが、通路の崩壊による電力線の切断等、AM信号が受信できない場合には、ソフトウェアによる時刻同期に切り替えを行う。ソフトウェアによる時刻同期ではRT-Linkパケットのヘッダ部分にスロット番号を格納し時刻同期メッセージとして送信することでローカルな時刻同期を行う。各ノードは時刻同期メッセージの受信までスリープせずに待機することになるため、ハードウェアによる時刻同期よりも電力の消費が大きくなってしまいがソフトウェアによる時刻同期による切り替えを行うことで実環境における緊急の事態に対応する。

3.3.3. マルチレート

RT-Linkでは表1に示す6つの異なる通信レートをサポートする。通信レートの調整は1フレームにおけるノードに割り当てられるスロット数・フレーム数を変化させることで行う。レート1ではノードは全てのフレームで通信を行い最大149.3Kbpsのスループットが得られる。またレート2ではノードは1つおきのフレームで送受信を行う。この場合、全てのスロットが割り当てられていると、6msの間に512のスロットで送受信を行うことになり、74.6Kbpsのスループットが得られる。

4. RT-Linkにおける音声通信

災害時等、センサネットワークを利用した音声通信には、双方向音声通信や片方向のpush-to-talk, voice-mailな

表1 RT-Link マルチレートサポート

Rate Index	Slot Interval	Frames /Cycles	Max Throughput (Kbps)
0	-	0	0
1	1	32	149.3
2	2	16	74.6
3	4	8	37.3
4	8	4	18.6
5	16	2	9.3
6	32	1	4.6

どのアプリケーションが考えられる。我々はその中でも帯域の確保やエンド・エンド間での遅延の制約が厳しい双方向音声通信に着目する。音声コーデック手法には、低データ転送速度による通信が可能な適応的差分PCM(ADPCM)を用いる。ADPCMでは、過去の入力信号から現在の入力信号を予測し、その予測誤差を量子化する。そのため符号化された音声データは1/4まで圧縮できる。我々はマイクロフォンによる4KHzのサンプリングから8bitの値を出力し、ADPCMによる符号化で4bit, 3bit, 2bitのそれぞれの値に圧縮している。そのため64Kbpsの通信速度を16Kbps, 12Kbps, 8Kbpsのそれぞれの通信速度に抑えることが可能となる。

4.1. FireFlyにおける音声符号化

FireFlyではマイクロフォンからのサンプルを取得するとすぐにADPCM符号化を行う。ADPCMによる性能をみるため、表2にノード・ゲートウェイ間におけるADPCMと携帯電話での音声通信に使われているGSMの符号化データにおける片方向同時通信可能ストリーム数を示す。rをRT-Linkの転送レートとするとスロット数は 2^r と示すことができる。

レート1, 2では全てのノードが全てのまたは1つおきのスロットをそれぞれ使用するため、シングルホップ通信のみが可能となる。つまりレート1では6ms毎に次ホップに転送されることとなる。1スロット6ms間に24bytesの生音声データ、12bytesのADPCM-1データ、6bytesのADPCM-3データを記録することができる。この時、112byteのペイロードに最大9つのADPCM-1データを格納することが可能であり、

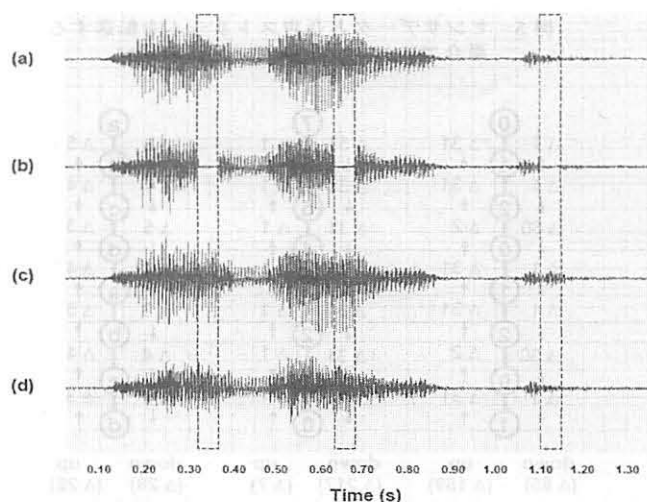


図4 通信レートと音声品質

表 2 RT-Link 音声品質

Link Rate	Raw Audio 32Kbps	ADPCM-1 16Kbps	GSM-1 13Kbps	ADPCM-2 12Kbps	ADPCM-3 8Kbps	GSM-2 8Kbps	Avg. Hop Delay	Voice Reliability
1	4	9	11	12	18	21	6ms	Single
2	2	4	5	6	9	10	12ms	Single
3	1	2	2	3	4	5	24ms	Single
4	1	2	2	2	4	4	24ms	Double
5	0	0	0	0	4	4	48ms	Double

6ms の間に同時に 9 つのフローを扱う事が可能となる。レート 3, 4 ではそれぞれ 4, 8 スロットが利用でき、隠れ端末問題が解消できている場合、ADPCM-1, ADPCM-2, GSM-1 では双方向でのマルチホップ通信が可能となる。レート 3 では 4 スロット毎にデータを送信することになり、次の送信タイミングまで 24ms の音声データを記録することが可能になる。レート 4 では 8 スロット毎にデータを送信することが可能であり、4 スロット毎に双方向通信が可能となる。

4.2. 音声品質のトレードオフ

RT-Link での通信レートが増加すると、同時通信可能なフローが減少する。これは送信間隔が大きくなるために、記録した音声データが大きくなってしまいうためである。レート 4 では 8 スロットが利用できるため双方向での ADPCM-1 データを送信する事が可能である。またこの時 ADPCM-3 データの場合は冗長データを共に送信することも可能となる。図 4 に高音声品質データ転送と低音声品質であるが冗長なデータを転送することが可能な場合のトレードオフを示す。図 4(a), (b) はそれぞれマイクロフォンから 4KHz でサンプリングした生データ、ADPCM-1 データの転送後の波形である。図

4(b) では 3 つの音声パケットがロスしている。図 4(c) は音声パケットのロス時に、1 つ前の音声パケットを挿入した結果を示している。この場合、受信側で再生される音声は部分的にエコーが発生することになるが、会話を聞き取ることが可能である。図 4(d) では ADPCM-3 による転送後の波形である。図 4(a)(b)(c) に比べ音声品質は悪いが、冗長なパケットの転送を行っているため音声パケットのロスによるエコーや部分音が無いことがわかる。図 9 に示すように大部分のパケットエラーは 1 つのパケットロスが原因となっており、バーストしたパケットロスは比較的少ないことがわかる。そのため、我々は双方向音声通信において、パケットエラーが少ない場合はレート 4 で ADPCM-1 を選択し、エンド・エンド間でのパケットエラーが 10% を超えた場合は ADPCM-3 を選択することとする。

4.3. シグナリング

モバイルノードがネットワークに接続し音声通信を行うために、我々は簡単なハンドシェイクによるシグナリングを行う。インフラ化された固定のノードは送信時にスロット番号とゲートウェイまでのホップ数を格納した HELLO メッセージをブロードキャストする。HELLO メッセージを受信したモバイルノードは、次のサイクルが来ると、固定ノードに CONNECT メッセージを送信する。複数の HELLO メッセージを受信した場合は、SNR(Signal to Noise Ratio) 値の強いノードに CONNECT メッセージを送信する。CONNECT メッセージを受信した固定ノードは、そのメッセージを上流のノードに転送する。途中ゲートウェイまで転送できないと判断したノードは CALL_REJECT メッセージと REASON コードを返信する。CONNECT メッセージがゲートウェイに到達するとゲートウェイはモバイルノード宛に CALL_ACCEPT メッセージを送信し、モバイルノードまでの経路に表 2 に示すレートを設定する。一度呼を確立するとモバイルノードは必要な期間、経路をリソースし通信が可能となる。

5. スケジューリング

本章では任意のノードからゲートウェイまでの双方向音声通信を行うためのスケジューリングの手法について述べる。

双方向音声通信を行うためには、上り、下り両方向での遅延時間のバランスをとる必要があり、音声パケットはそのタイムライン内に到達することを保障しないとしない。エンド・エンド間での遅延時間はホップ数と TDMA スロットのレートにより算出できる。双方向音声通信の場合、エンド・エンド間での遅延時間は 250ms まで許容でき、遅延時間がそれ以上になると通常の会話をするのが困難となる。以上のことから、音声パケットのスケジューリングには、必要なスロット数を最小化しデータレート n を最大化させ、また双方向での音声パケットの遅延時間をバランスさせるようなスロットの割り当てを経路上のノードに行うことが必要となる。

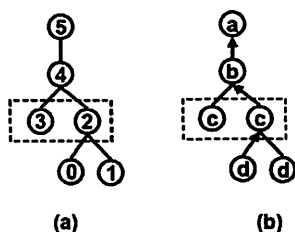


図 5 センサデータと音声ストリームを転送する場合でのスロット割当て手法の違い

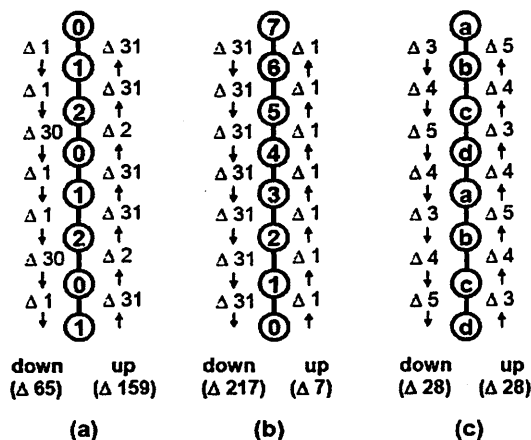


図 6 ポリシの異なるスケジューリング手法

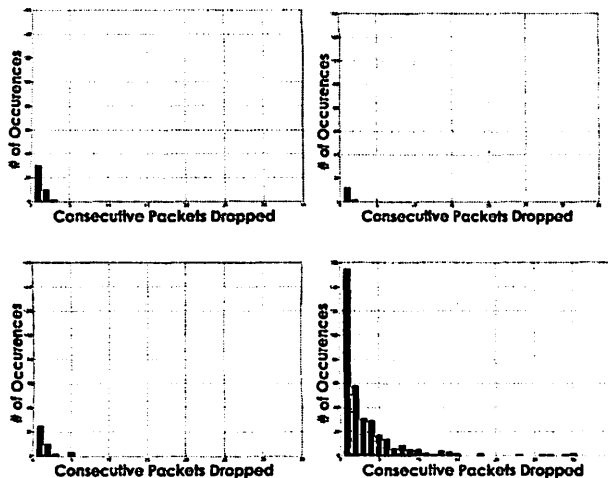


図9 パケットロス率における連続パケットロス数の割合

化させた場合の影響を測定した。図中においてプロットのある実線が jammer ノードを配置した場合で、横軸は受信ノードから jammer ノードまでの距離を表す。送信ノードから受信ノードに向けて 2000 パケットを送信した結果、jammer ノードによる影響は、jammer ノードから受信ノードまでの距離による影響が送受信ノード間の影響よりも強いことが分かった。また送信ノードから jammer ノードまでの距離が 9m 以下で比較的小さい場合約 20% のパケット受信率を維持している。以上の結果から安定通信距離の 2 倍以上であれば jammer ノードからの影響をほとんど受けない事が分かった。そのため、同時にパケットを送信するノードは少なくとも 20m 以上離す必要があると考えることができる。

6.2. 炭鉱内実験

我々は 3 週間にわたって 42 個のノードを米国ペンシルベニア州にある米国労働安全衛生研究所管轄の試験用炭鉱に配置した。炭鉱は炭層内を約 3.2Km にわたる通路で構成されている。図 8 に炭鉱に配置したノードの位置を炭鉱の地図と共に示す。図中の実線は無線通信に十分な強度の無線リンクであり、点線は比較的小さい無線リンクを表している。図中の各ノードはセンサデータの配送と音声通信の 2 つのタスクを割り当てられている。音声通信のためのスケジュールは表 3 における a, b, c, d の各アルファベットで表している。またアルファベット横の数字はセンサデータ転送のためのスロット番号を示す。

各ノードは照度、温度、電力残存量、近くに存在するモバイルノードの SNR を 6 秒毎にゲートウェイへ送信している。モバイルノードが音声通信を行う場合は、呼を確立することで双方向音声通信が可能となる。モバイルノードは装備されたマイクロフォンから音声データを取り込み、それを圧縮して送信する。音声データを受信し再生する場合は、Digital Analog Converter (DAC) によってアナログ信号に変換し、スピーカによって出力する。しかし本実験ではモバイルノードに DAC とスピーカを装備していないため、モバイルノードをラップトップ PC に接続し、PC 内で D/A 変換を行い音声再生した。我々はエンド・エンド間でのパケットロス率の増加に伴う連続パケットロスの割合を知るため、8 ホップ間において音声パケットの転送を行った。図 9 に 4 種類のエンド・エンド間パケットロス率における連続パケットロス数の割合を示す。

炭鉱内の通路において採掘機器や炭鉱作業員等の影響でパケットロス率が 50% 以上になると、より多くの連続したパケットの欠落が目立つことが分かる。炭鉱内の通路は狭いため障害物の存在がパケットロスに大きく影響している。炭鉱内への大規模なメッシュネットワークの構築によって、このような障害物がある場合は迂回経路を使うなどの方法が考えられる。また、今回の実験において 8 ホップ離れたノード間でのエンド・エンド間遅延時間は全て 200ms 以下であり予想遅延時間を満たしていた。

7. まとめ

本稿では無線マルチホップ通信によるリアルタイム音声通信のためのプラットフォーム FireFly の設計を行い、実環境への配置による実験結果を述べた。3 週間での炭鉱内実験の結果から、エンド・エンド間での音声パケットの遅延時間は双方向でほぼ同じであり、遅延のバランスが取れていることがわかった。またパケットロス率が低い場合は高レートの ADPCM における符号化を行い、パケットロス率が高い場合は低レートの ADPCM における符号化を行う必要があることもわかった。本稿では 1 つの呼に対し 1 つ経路を構築しているが、現在冗長な経路を構築することで、音声通信中の経路の中断に耐えうる設計を行っている。

参考文献

- [1] J. Polastre and R. Szewczyk and D. Culler, "Telos: Enabling Ultra-Low Power Wireless Research," IPSN/SPOTS, Los Angeles, CA, USA, 2005.
- [2] R. Szewczyk and A. Mainwaring and J. Polastre and J. Anderson and D. Culler, "An analysis of a large scale habitat monitoring application," Proc. of SenSys, Baltimore, MD, USA, 2004.
- [3] N. Xu et al., "A Wireless Sensor Network for Structural Monitoring," Proc. of SenSys, Baltimore, MD, USA, 2004.
- [4] D. Malan and T. Jones and M. Welsh and S. Moulton, "CodeBlue: An Ad Hoc Sensor Network Infrastructure for Emergency Medical Care," In Proceedings of the MobiSys 2004 Workshop on Applications of Mobile Embedded Systems (WAMES 2004), Boston, MA, 2000.
- [5] V. Rajendran and K. Obraczka and J. J. Garcia-Luna-Aceves, "Energy-efficient, Collision-free Medium Access Control for Wireless Sensor Networks," Proc. of SenSys, 2003.
- [6] L.F.W. van Hoesel and P.J.M. Havinga, "A Lightweight Medium Access Protocol for Wireless Sensor Networks," INSS, 2004.
- [7] ADPCM using PICmicro Microcontrollers, App. Note AN643. Microchip Technology Inc., 1997.
- [8] ADPCM Decoder on Atmel, App. Note AVR336. Atmel Corporation, 2004.
- [9] Atmel Corporation, ATMEGA32 Data sheet, 2005
- [10] Anand Eswaran and Anthony Rowe and Raj Rajkumar, "Nano-RK: an Energy-aware Resource-centric RTOS for Sensor Networks," IEEE Real-Time Systems Symposium, 2005
- [11] Anthony Rowe and Rahul Mangharam and Raj Rajkumar, "RT-Link: A Time-Synchronized Link Protocol for Energy-Constrained Multi-hop Wireless Networks," CMU Tech Report TR05-08, 2005

ネットワークスケジューリングを行うにあたり、音声通信だけでなく、同時に他のネットワークアプリケーションの要求も満たす必要がある。音声通信には遅延時間に対して厳しい要求があるため、最初に音声ストリームのためのスロットを優先的に予約し、次に余ったスロットをセンサデータ転送等の低データレートのタスクに割り当てる必要がある。図 5 にセンサデータを転送する場合と音声データを転送する場合のスロット割り当て手法の違いを示す。図中の円はノードを表し、数字・英字はスロットを表す。図 5(a)はセンサデータを転送する場合であり、隠れ端末問題を解消しパケットの衝突を起こさないために、各ノードの 2 ホップ以内に同一スロットが割り当てられないようにスケジューリングしたものである。それに対し 1 つの音声ストリームを扱う場合、図 5(b)に示すようにツリー型になっているグラフの同階層のノードは同一のスロットを割り当てることが可能であり必要なスロット数を減らすことが可能となる。また一時的な通信の場合、音声通信における送信元から宛先ノードまでの経路のみのスロット割り当てを考慮すればよいことがわかる。図 6 にデータの送信元から宛先までの経路上において特徴の異なるスケジューリング例を 3 つ示す。図中の矢印と Δ はそれぞれパケットの転送方向と次ホップにパケットを転送するまでの遅延時間(スロット数)を表している。次ホップノードに割り当てられたスロット番号が自ノードに割り当てられたスロット番号よりも小さい場合、次の TDMA フレームまで待つことになり大きな遅延を生じる。図 6 において、(a)は使用色を最小に抑えたスケジューリングパターンである。この場合、最大で 1 ホップに 31 スロット分の遅延が生じてしまうことが分かる。図 6(b)は片方向ストリームの遅延を最小化したスケジューリングパターンであり、ダウンストリームの 1 ホップ毎の遅延が 31 スロット分であるのに対しアップストリームは 1 スロット分の遅延に抑えられていることが分かる。図 6(c)は双方向において遅延時間のバランスを取っている場合である。図中の英字はスロット番号であり表 3 に具体的なスロット番号を示す。この場合両方向において 1 ホップ毎の遅延が約 4 スロット分となっていることが分かる。

TDMA 通信では、エンド・エンド間での高スループットを実現するために、使用するスロット数を最小化することが必要

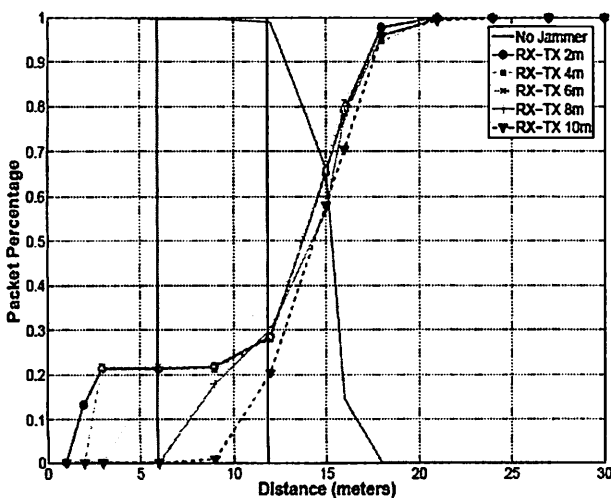


図 7 無線干渉下におけるパケット受信率の変化

	TX スロット	RX スロット
a	0, 8, 16, 24	3, 11, 19, 27
b	3, 11, 19, 27	7, 15, 23, 31
c	7, 15, 23, 31	4, 12, 20, 28
d	4, 12, 20, 28	0, 8, 16, 24

となる。しかし、ある閾値以上の遅延を許容できないようなアプリケーションの場合、使用するスロット数を減らすと同時に経路上のノードに割り当てるスロット番号の順番が重要になる。これは図 6(c)では 8 スロットを使用しているが、3 スロットを使用している図 6(a)よりもエンド・エンド間での遅延が少ない事からわかる。

6. 実験・議論

本章ではノードの配置のための無線干渉実験と試験用炭鉱にノードを配置し実験を行った結果とその議論について述べる。

6.1. 無線干渉実験

我々はまずノードの無線干渉範囲を知るため、ノードを 1 列に並べ、送信ノード・受信ノード間距離の変化によるパケットロス率を測定した。安定した通信が可能な送受信ノード間距離(安定通信距離)を特定後、連続して送信を繰り返すノード(jammer ノード)を受信ノード側に配置し、無線通信へ与える影響を測定した。図 7 にその測定結果を示す。図 7 においてプロット無しの実線は送信・受信ノード間距離のに対するパケット到達率であり、横軸は送信・受信ノード間の距離を表している。送信・受信ノード間距離が 10m 以内の場合パケット到達率がほぼ 100%であることがわかる。我々はさらに送信ノードを受信ノードから 2m, 4m, 6m, 8m, 10m, 12m のそれぞれの位置に配置し、jammer ノードの位置を変

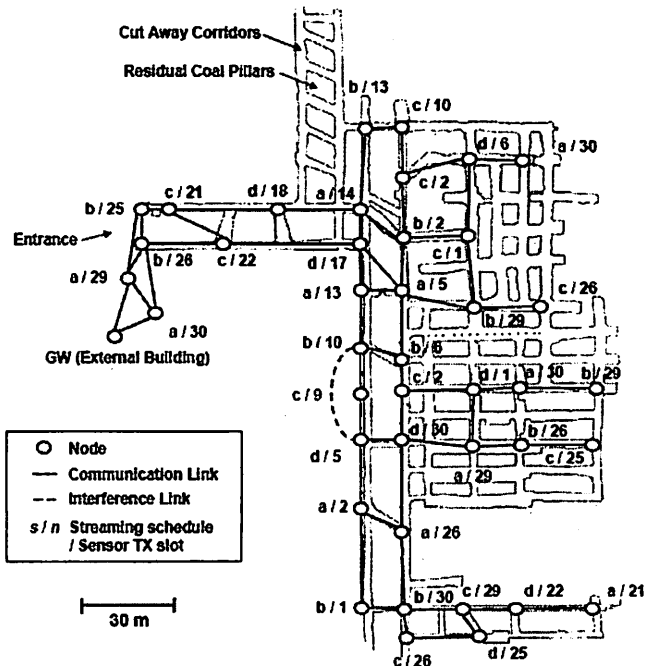


図 8 NIOSH 炭鉱におけるスケジューリング