LTE 回線を使用した IP 変換装置 Adaptive Gateway の開発

龍 浩一 Koichi Ryu, 原田 浩 Hiroshi Harada, 小林正直 Masanao Kobayashi, 高鷲健二 Kenji Takawashi, 黒須歩刀 Ayuchi Kurosu, 寺岡延和 Nobukazu Teraoka

[要 旨]

近年、社会インフラシステムでは、アナログ通信設備の経年やシステムの高度化に伴い、通信回線をアナログ専用線から IP(Internet Protocol)回線に統合する動きがある。しかし、アナログ通信設備を IP 通信設備に更新するには、高額なシステム更新費用が発生する。また、社会インフラシステムの更新周期は約20年と長く、システムの IP 化が進まないという課題がある。これらの課題に対応するため、既設システムを変更することなく、低コスト LTE(Long Term Evolution)回線でアナログ専用線の IP 化を可能とする IP 変換装置「NN4000 シリーズ Adaptive Gateway」を開発した。本稿では、Adaptive Gateway 製品と、採用した技術、特長を紹介する。

1 まえがき

これまで社会インフラシステムの通信基盤を支えてきた、アナログ専用線を使用したアナログ通信設備は、更新時期を迎えている。 また、システムの高度化に伴い、IP(Internet Protocol)通信設備への更新需要が高まっている。

しかしながら、厳しい財政状況から、更新時期を迎える情報板などの社会インフラ設備への投資が難しくなっている。そのため、大規模なシステム更新ではなく、既設アナログ通信設備を利用し、通信回線をIP回線にするという、段階的なIP化を行う更新方式が求められている。また、保守コストや通信コスト削減を目的に、低コストIP回線の需要があるが、適切な回線が見つからない状況である。

光ファイバによる有線 IP 回線は,広帯域,高品質,高信頼性であるが,敷設工事が必要で,敷設箇所が限定され,回線費用も高額という課題がある。

一方、LTE(Long Term Evolution)回線の場合、人口カバー率が 99.8%以上と、社会インフラシステム向け通信で必要なエリアをほぼ 100%網羅しており、新たな工事は必要ない。また、総務省が MVNO(Mobile Virtual Network Operator)を推進したことで、通信事業者の LTE 回線サービスは多様化し、低コストのデータ通信サービスが充実している 1)。

しかし、低コスト LTE 回線は、帯域保証型、優先制御型の LTE 回線や光ファイバなどの有線回線と比べ、パケット損失、パケット揺らぎによる通信品質の劣化や、回線断による通信障害の発生など信頼性に課題がある。

このような状況を受け、当社は、これまで開発してきた IP 通信機器の開発経験を活かし、IP変換装置「NN4000シリーズ Adaptive Gateway」を開発した(図 1)。



図 1 Adaptive Gateway(NN4004A)の外観

Adaptive Gateway は、低コスト LTE 回線でアナログ専用線の IP 化を可能とする IP 変換装置である。本装置を使用することで、低コスト LTE 回線における通信品質、信頼性の課題を解決し、既設アナログ通信設備を継続使用しながら、IP 通信設備と混在したシステム構築が可能となる。社会インフラシステムの課題である、老朽化設備の更新やシステム高度化への対応が可能となる。

本装置は、アナログ通信設備の信号をデジタル化し、IP パケットにカプセル化することで、アナログ専用線の IP 化を可能にする。本装置をネットワークの両端に設置することで、安定したアナログ専用線の IP 化を実現する(図 2)。

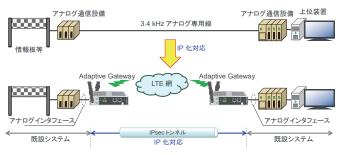


図2 LTE 回線によるアナログ専用線 IP 化の例

2 開発方針

品質と信頼性が要求される社会インフラシステムの通信を低コスト LTE 回線で IP 化するためには、以下の製品要件を満足する必要がある。

(1) 既設設備の利用

既設アナログ通信設備を IP 通信設備に更新すると,高額な費用が発生する。そのため,既設システムをそのまま利用可能な IP 化方式が求められる。

(2) 通信品質と信頼性の確保

アナログ専用線を使用しているシステムは、24 時間 365 日の安定稼働が前提で、これまでと同等の通信品質と信頼性が要求される。一方、低コスト LTE 回線では、MNO(Mobile Network Operator)ネットワークを共有することから、パケット損失やパケット揺らぎが発生し、通信品質がアナログ専用線と比べて低い。また、LTE回線の通信障害が発生すると、システム停止に陥る可能性がある。そのため、低コスト LTE 回線による IP 化では、本装置間で通信品質と信頼性を改善する対策を講じ、システム運用に影響のない通信を実現する必要がある。

なお、本稿では、通信品質の指標をパケット損失や揺らぎにより 発生するアナログ通信のビット誤り率とし、信頼性の指標をシステム の稼働率としている。

(3) 通信帯域

LTE 回線は、通信事業者が提供するサービスにより回線帯域が異なる。一般的な低コストLTE回線は、通信帯域が128 kbit/s に制限されるため、本装置で使用する通信帯域は128 kbit/s 以下とする。

3 製品の特長

3.1 IP 変換方式

本装置では、アナログ通信端末から入力されるアナログ信号を μ-law 方式によりエンコード後、IP パケットにカプセル化し対向装置に 送信する。また、カプセル化された IP パケットを受信し、デコードする ことでアナログ信号を再生する。これらを逐次処理することで、双方向 のアナログ信号による通信を IP 回線で行うことができる(図 3)。



図 3 IP 変換方式

本方式は、アナログ信号をそのまま伝送することと等価であるため、アナログ通信端末の種別に関係なく回線の IP 化が可能である。

3.2 通信品質改善機能

通信品質を改善するため、本装置では以下の品質改善機能を 実装した。

(1) 揺らぎ吸収機能

一般的な低コスト LTE 回線では、等間隔なパケット入力に対し、ネットワーク内でパケットが停滞したり、バーストしたりする揺らぎが発生する。大きな停滞が発生すると、アナログ信号が途切れてしまう。そのため、本装置では最大 990 ms のアナログ信号データ専用のバッファを設けることで、揺らぎ吸収を可能とした(図 4)。

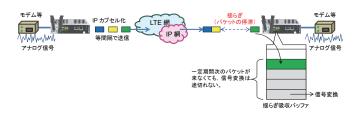


図4 揺らぎ吸収バッファ

(2) パケット再送機能

低コストLTE 回線を使用したネットワークでは、パケット損失が発生する。そのためパケット再送機能によりパケット損失を回避する。

TCP(Transmission Control Protocol)の再送時間は実装により異なるが、TCPの再送タイマについて記述されている RFC6298では、最小 1 秒、最大 60 秒となっている。秒単位の遅延は、アナログ端末の通信において許容できないため、本装置では、リアルタイム性の高い UDP(User Datagram Protocol)を採用した。UDPには再送機能がなく、独自に実装する必要があるが、アプリケーションに合わせた実装が可能である。本装置では、UDPによる遅延の少ない独自の再送機能を実現した。UDPパケットに管理 IDを付与し、管理することでパケット損失を即時検出、再送処理を行う。再送処理中は、揺らぎ吸収バッファに格納されているアナログ信号データを逐次変換することで、アナログ信号の連続性を維持している(図 5)。

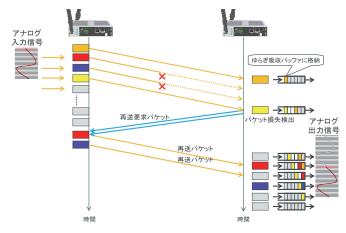


図 5 パケット再送機能

(3) パケット復元機能

UDP パケットに冗長パケットを付加し、ほかの UDP パケットと合わせて損失したパケットを復元する機能である(図 6)。

冗長パケットは、指定した数の UDP パケットで XOR(排他的論理和)演算したものを付加する。XOR 演算したパケットのうち、1 パケット損失が発生した場合、再送することなく冗長パケットから復元可能である。冗長度(XOR 演算する対象パケット数)を少なくすると復元率が高まるが、その分通信帯域を必要とするため、使用する回線帯域に合わせて冗長度を設定できるようにした(表 1)。

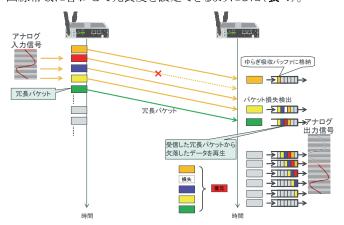


図 6 パケット復元機能(冗長度 4 の場合)

表 1 通信帯域

復元パケット	通信帯域【kbit/s】			
冗長度	IPsec 無効	IPsec 有効		
0(Disable)	78	88		
2	117	133		
3	104	118		
4	98	110		
5	94	106		
6	91	103		
7	89	101		
8	88	99		
9	87	98		
10	86	97		
11	85	96		
:	:	:		
20	82	92		
:	:	:		
30	80	91		

注:冗長度は数字が低いほど高い

3.3 回線冗長機能

通信信頼性を向上するため、回線冗長機能を実装した。LTE 回線は、株式会社 NTTドコモと KDDI 株式会社の 2 キャリアに対応し、回線冗長化を実現した。一方のLTE 回線が工事や通信障害などで不通になった場合、もう一方のLTE 回線で通信が継続可能である(図 7)。

設定により、Primary 回線と Secondary 回線を指定し、通常動作時は Primary 回線で通信を行う。Primary 回線で通信障害を検出した場合、通信経路を Secondary 回線に切り替える。その後、通信障害の復旧を検出した場合は、通信経路を Primary 回線に戻す。

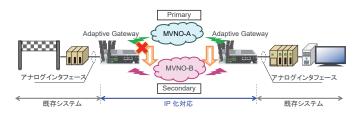


図7 回線冗長機能

3.4 セキュリティ機能

IP 通信のセキュリティを確保するため、IPsec(IP Security Architecture)による VPN(Virtual Private Network)機能を実装した。パケットを暗号化することで、データの改ざんや盗聴を防止している。IPsec による VPN は、パケットにトンネルヘッダが付与され、暗号化することでパケットサイズが増加する。これらを考慮しながら、128 bit/s 回線の低コスト LTE 回線においても IP 化可能な通信帯域になるよう、パケットサイズとパケット送信間隔を設計する必要がある(3.5 項参照)。

本装置では、暗号方式を AES(Advanced Encryption Standard)、鍵ビット長を 128 bit とした。また、暗号モードは付加的なデータ量が少ない CTR モード(Counter Mode)とした。

3.5 通信帯域

アナログ信号をエンコードする μ -law 方式では、125 μ s ごとに 1 byte のデジタルデータが生成される。広帯域の IP 回線であれば、遅延を最小にするため、125 μ s ごとにカプセル化した UDP パケットを送出することも可能だが、UDP パケットの最小サイズが 64 byte であるため、64 倍の 4,096 kbit/s の通信帯域が必要となる(図 8)。

128 kbit/s 以下の通信帯域とするため、データをまとめて送出すると、まとめた分の遅延が発生する。そのため、遅延量とデータサイズのバランスを考慮し、100 kbit/s 程度の通信帯域となるよう、適切な値をとる必要がある。

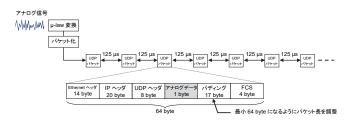


図 8 1 byte ごとの送信

本装置では30 msごと、つまり240 byteを1つのパケットにカプセル化して送出することとした。IPsec 無効の場合、必要帯域は78 kbit/sとなり、128 kbit/s回線の占有率は61%となる。IPsecを有効とし、パケット復元機能の冗長度を10とした場合、必要帯域は97 kbit/s(約100 kbit/s)となり、これを本装置の標準的な設定としている(表1)。

先に記述したパケット再送機能による再送要求パケットやパケット 復元機能による冗長パケット, セキュリティ機能で必要な通信帯域と, 発生する遅延量のバランスから上記値(240 byte/30 ms)とした。

図9に本装置のUDPパケットフォーマットを示す。

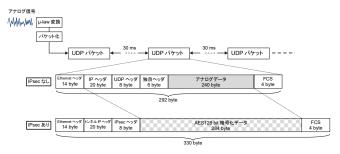


図 9 240 byte ごとの送信

4 設計留意点

4.1 装置アーキテクチャ

本装置のブロック図を図 10 に示す。アナログ信号のリアルタイム 処理と IP パケット処理における通信品質改善を同時に行うため、デュアルコア SoC(System on a Chip)を採用した。アナログ信号 の入出力処理は高精度な周期的リアルタイム処理が要求されるため、SoC コアの 1 つを専用に割り付けることで安定処理を実現した。もう 1 つのコアは、アプリケーションソフトウェアを動作させ、IP パケット処理や通信品質改善機能を実行する。

4.2 インタフェース

(1) LAN(Local Area Network)側インタフェース

既設アナログ通信設備を接続するアナログ回線インタフェースと、 将来的にアナログ通信設備をIP通信設備端に更新することを想定 し、LAN ポートを用意した。

(2) WAN(Wide Area Network)側インタフェース

WAN 回線として、LTE 回線を 2 回線と有線 WAN ポートを用意 した。LTE 回線または有線回線による IP 化が可能で、LTE2 回線 による冗長、あるいは有線と LTE 回線の冗長が可能である。LTE2 回線による冗長の場合、異なるキャリアで冗長が可能である。

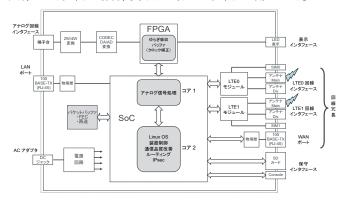


図 10 システムブロック図

4.3 クロック補正機能

前述したように、本装置はネットワークの両端に設置することで、アナログ専用線の IP 化を実現する。IP 変換する際、アナログ信号を μ -law 方式により A/D(D/A)変換するが、その変換レート(サンプリング周波数 8 kHz、量子化ビット数 8 bit) は対向装置で ppm オーダの差が発生する。例えば、8 kHz の A/D 変換に対し、対向装置の D/A 変換が 8 kHz -50 ppm の場合、2.5 秒ごとにバッファが 8 bit 増加する。そのため、揺らぎ吸収バッファのオーバーフローが発生し、アナログ信号の連続性を維持できない(図 11)。

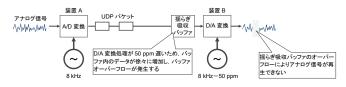


図 11 クロック誤差による影響

また、アナログ専用線の通信装置であるモデムは、専用線を想定した設計となっており、IP変換により発生するジッタ(短時間に発生する信号の時間軸変動)やワンダ(長時間で発生する信号の時間軸変動)、大きな遅延変動によるエコーキャンセルを考慮していない。IP変換装置の課題は、接続されるモデムに対し、専用線と同等のアナログ信号特性で信号を再現することである。

本装置では、1 byte(125 μs)ごとに管理可能な揺らぎ吸収バッファを FPGA で実現することにより、バッファ量の増減を監視し、クロック調整を行っている。125 μs と細かい単位でクロック調整することで、ジッタやワンダ、遅延変動を減らし、長期間安定したアナログ通信を実現している(図 12)。

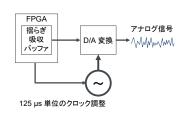


図 12 FPGA によるクロック補正機能

4.4 設置環境

本装置は、屋内設置だけでなく、アナログ通信設備を収容した 既設屋外盤内の空きスペースを使用して設置を行う。そのため、以 下の要求を満足する必要がある。

(1) 小型化

既設屋外盤内の空きスペースは限られているため、できる限り小型化する必要がある。当社の施工経験から、35(H)、160(W)、130(D)mm(突起物、AC アダプタを除く)以下のサイズを目標とし、小型化を実現した。

(2) 耐環境

屋外盤内の温度は、夏季の日射条件によっては、50℃を超えることがあり、冬季の寒冷地では氷点下になる。そのため、本装置では、耐環境仕様として-20~60℃の動作温度を実現した。また、筐体放熱構造を採用することで、ファンレスとした。

5 通信品質改善機能の効果

実際に低コスト LTE 回線を使用した IP 化試験を行った。同一 MVNO キャリアの低コスト LTE 回線を使用し,24 時間分の測定を 行い,揺らぎ吸収バッファの効果と,通信品質改善機能(再送・復元)を有効とした場合,無効とした場合とで結果を比較した。揺らぎ 吸収バッファは 510 ms とした。試験構成を図 13 に示す。



図 13 試験構成

5.1 揺らぎ吸収機能

低コスト LTE 回線で発生したパケット揺らぎの分布を図 14 に示す。揺らぎ分布は、本装置の受信パケット間隔を統計処理したものである。

測定結果から,500 ms 以上の揺らぎもわずかに存在するが,揺らぎ吸収バッファ(510 ms)により,99.999%以上のパケット揺らぎを吸収できることが確認できた。

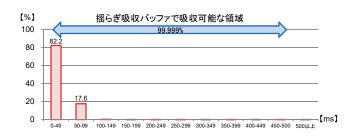


図 14 揺らぎ分布

5.2 パケット再送・復元機能の効果

対向装置間で発生した, 時刻別パケット損失数のグラフを**図 15**, **図 16** に示す。**図 16** は再送・復元機能を有効にした場合で, パケット損失が低減されていることが分かる。本試験では, パケット復元機能の冗長度を 10 とした。

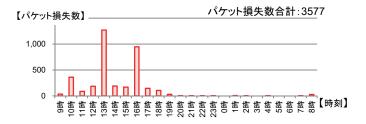


図 15 パケット損失数(再送・復元無効)

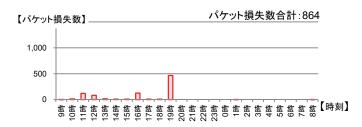


図 16 パケット損失数(再送・復元有効)

表 2 にアナログ通信におけるビット誤り率を示す。再送・復元機能を有効にした場合、ビット誤り率が改善されていることが分かる。また、ビット誤り率は、揺らぎ吸収機能とパケット再送・復元機能の効果により、3.03×10⁻⁵となった。

東日本電信電話株式会社と西日本電信電話株式会社が発行する技術参考資料 $^{2),3)$ によると、アナログ専用線のビット誤り率は、4,800 bit/s モデムを使用した場合に、 1×10^{-5} 程度(参考値)と示されており、これに近い値となった。

表 2 アナログ通信ビット誤り率

	ビット誤り率		
再送•復元機能有効	3.03×10^{-5}		
再送•復元機能無効	2.45×10^{-4}		

注:本試験結果は、実測データの1つであり、保証される数値ではない。

6 機能

表3に本装置の主要諸元を示す。

7 むすび

本稿では、NN4000 シリーズ Adaptive Gateway の特長および 採用した技術について述べた。

既存設備の更新対策や通信コストの削減は、国や自治体、企業の共通課題である。IT 技術が日々進化する中、すべてを理想的に取り入れることはできない。低コストLTE回線を使用したアナログ専用線のIP 化が、社会インフラシステムに貢献できれば幸いである。

参考文献

- 1) 平成 30 年版 情報通信白書 総務省
- 2) 一般専用サービスの技術参考資料 東日本電信電話株式会社
- 3) 一般専用サービスの技術参考資料 西日本電信電話株式会社

執筆者



龍 浩一 アンリツネットワークス㈱ 事業開発本部 開発部



原 田 浩 アンリツネットワークス(株) 事業開発本部 開発部



小 林 正 直 アンリツネットワークス㈱ 事業開発本部 開発部



高 鷲 健 二 アンリツネットワークス㈱ 事業開発本部 開発部



黒須歩刀 アンリツネットワークス㈱ 事業開発本部 開発部



寺岡延和 アンリツエンジニアリング㈱ 第3事業部 情報通信ソリューション部

表 3 諸元表

		機能項目		NN4001A	NN4002A	NN4003A	NN4004A	
1 1	ポート数		1	<u>l</u>	I.	-1		
		周波数帯域	周波数带域		300 Hz~3400 Hz			
		通信方式		2線式または4線式				
		標本化	標本化		8 kHz/8 bit			
	アナログ回線 インタフェース	符号化方式		μ-law 方式				
		インタフェース		コネクタ				
		入出力インピーダンス		600 平衡(公称)				
		2W	入力レベル	0 dBm				
			出力レベル	-8 dBm				
		4WS	入力レベル	0 dBm				
		4WR	出力レベル	0 dBm				
		レベル	入力レベル	0∼-15 dBm(SPAD)				
		調整	出力レベル	0∼−15 dBm(RPAD)				
		ポート数		1				
2	LAN ポート	インタフェース		RJ-45				
2		Ethernet 規格		10BASE-T/100BASE-TX(Auto Negotiation)				
		最大フレー	最大フレーム長		1518 byte(VLAN Tag は未サポート)			
	WAN ポート	ポート数	ポート数		1			
3		インタフェース		RJ-45				
		Ethernet 規格		10BASE-T/100BASE-TX(Auto Negotiation)				
		最大フレーム長		1518 byte(VLAN Tag は未サポート)				
	キャー 通信 アンシ 通信	対応 キャリア	NTTドコモ	_	0	_	0	
			KDDI	_	_	0	0	
		通信方式		_	FDD-LTE			
4		アンテナ数		_	2	2	4	
		通信速度注	2	_	Category 4 下り最大 150 Mbit/s (理論値) 上り最大 50 Mbit/s (理論値)			
		対応周波数	(帯	_	Band1, 19	Band1, 18	Band1, 18, 19	
5	揺らぎ吸収			90 ms~990 ms(30 ms ステップ)				
	パケット再送	<u> </u>	独自 UDP 再送プロトコル					
		パケット復え	Ē.	FEC によるパケット復元				
	回線冗長			任意の2つのインタフェースにて冗長				
6	VPN 機能			IPsec, IPIPトンネル				
7	コンソールポート			φ 2.5 mm ミニピンジャックによる RS-232C				
8	SD カードスロット			1 スロット				
9	ネットワーク管理 Ping, Traceroute, Telnet, SNTP, SYSLOG							

注 1:LTE 回線を使用する場合, キャリアとの通信回線契約が必要です。使用可能なエリアは, お客さまがご契約する通信回線に基づきます。

注 2: 規格上の理論値です。保証された通信速度ではありません。

公知