

特 集 論 文

Host-Based 方式ビル空調用 LON 通信ゲートウェイ

Host-Based Architecture LON Communication Gateway for Building Air-conditioner Monitoring System

蜷 川 忠 三^{*1}
Chuzo Ninagawa



LONWORKS はビル管理通信のデファクトスタンダードである。本論文ではパッケージエアコン用として世界最大の管理台数 96 台で、かつ、高速通信性能を持つ LON 通信ゲートウェイ開発を紹介する。キーとなる技術は、LON 専用プロセッサ Neuron Chip を通信コプロセッサとし、高速ホスト CPU で大容量のネットワーク変数进行处理する方式と、当社独自の通信プロトコルインターチェンジソフトウェアにより、従来機対比 1.7 倍の高速性能を達成した。

1. は じ め に

LONWORKS は、BACnet と並びビル管理通信プロトコルとしてデファクト標準となってきた。当社は数年前に、パッケージエアコン用としてこれらの通信ゲートウェイを開発したが⁽¹⁾、大容量高速化への市場要求が高まってきた。

近年のパッケージエアコンによるビル空調では、数百台の空調機が各 10 点程度の管理ポイントを持つという規模になってきた。これを LONWORKS で制御監視すると空調だけで数千点の LON ネットワーク変数を持つことになる。これらを複数の LON 通信ゲートウェイで分担して空調設備側の通信に変換するので、ゲートウェイ装置 1 台あたりの空調機管理台数によりそのビルに必要な装置台数が決まる。一般に、多少ゲートウェイ装置が複雑になっても設置台数が少ない方が全設備機器コストとネットワーク設定作業が削減され、トータルコストメリットが出ると言われている。

本論文では、パッケージエアコン用として世界最大の管理台数 96 台で、かつ、1 台のゲートウェイに LON 通信が集中してもボトルネックとならない高速通信性能を持つ LON 通信ゲートウェイ開発技術を紹介する。

2. LON 通信ゲートウェイ

LON 通信ゲートウェイとは、LONWORKS プロトコルによるビル管理通信を当社独自のパッケージア

コン用通信プロトコル“Superlink”に変換する装置である。図 1 に LONWORKS によるパッケージエアコン空調設備のビル管理システム系統図を示す。

LONWORKS は Media Access Control (MAC) 等通信機能が LON 専用プロセッサ“Neuron Chip”として提供されるので、異なるベンダー間でも完全に

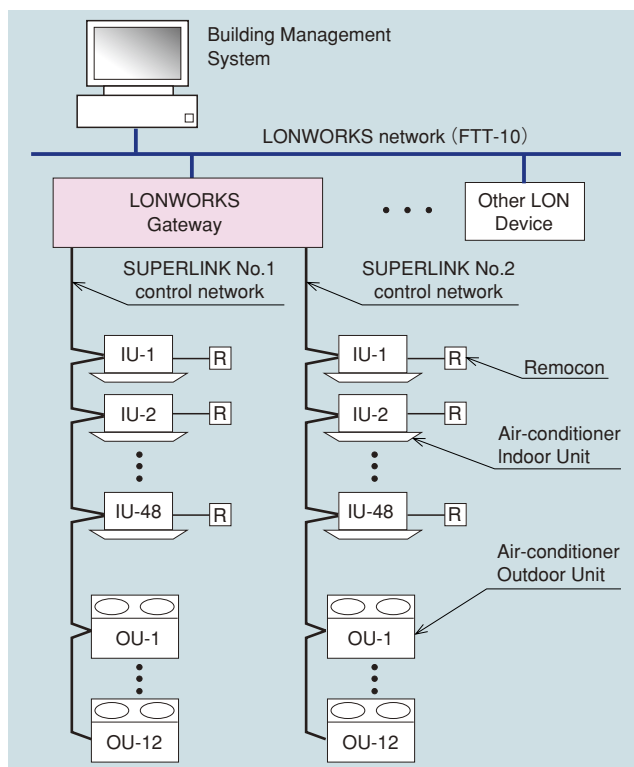


図 1 LON 通信ゲートウェイ系統図
空調制御通信ネットワークが 2 系統で 96 台の空調機を管理可能。

^{*1} 冷熱事業本部空調輸冷技術部電子制御設計グループ主席

通信接続性が確保できる。しかし、Neuron Chip は 1990 年頃の 8 ビットプロセッサなので、現時点では処理能力不足は否めない。その最たるものは、LON ネットワーク変数が Neuron Chip 内で 62 個しか定義できないことである。一般に、空調管理ポイントは空調機毎に十数点必要なので、62 変数では 4、5 台になってしまう。そのため、当社は従来 Neuron Chip をそれぞれ持つ LON ボード 4 枚で 1 台の装置として対応していた。しかし、通信ソフトウェアから見ると 1 台あたり 4 つの LON ノードを持つので、装置台数が多くなるとネットワーク変数バインドと呼ばれるソフトウェアのひも付け作業が煩雑となっていた。

新型 LON 通信ゲートウェイの外観をタイトル写真に、製品仕様を表 1 に示す。図 1 に示すように、管理可能なパッケージエアコン 96 台が、当社空調制御ネットワーク Superlink の 2 系統に 48 台ずつ接続できる。個々の空調機毎に運転指令、運転モード指令など 13 種の入出力ネットワーク変数を持つので、96 台分 1248 個とシステム全体対応 2 個のネットワーク変数の合計 1250 個をひとつの LON ノードで処理するものとなった。この 96 台というパッケージエアコン接続台数は、2006 年 2 月時点では二番手 64 台を大きく引き離し世界最大である。課題はこのような大規模な管理台数を持つが、Neuron Chip がボトルネックにならず飛躍的な性能向上を実現するアーキテクチャを考案することである。

表 1 新型 LON 通信ゲートウェイ製品仕様

ITEM	SPECIFICATION
Dimensions (mm)	260 (W) × 200 (H) × 79 (D)
Max. No. of air-conditioners	96 indoor units
Max. No. of Network Variables	4096 NVs in 1 node
Implemented No. of NVs	1250 NVs
LON datalink protocol	LonTalk EIA-709.1-A
LON physical layer	FTT10 A, 78 kbps
Superlink datalink protocol	CSMA/CD
Superlink physical layer	RS485 9.6 kbps
Superlink cabling	Twisted pair, Max. 1000m

3. システムアーキテクチャ

3. 1 LON Host-Based 方式

図 2 に従来機と新開発機の LON 通信ゲートウェイとしてのアーキテクチャを示す。従来機種は装置の中に 4 枚の LON ボードを内蔵させた Neuron-Based 方式であった。つまり、Neuron Chip 内蔵の 3 つの CPU (MAC CPU, Network CPU, Application

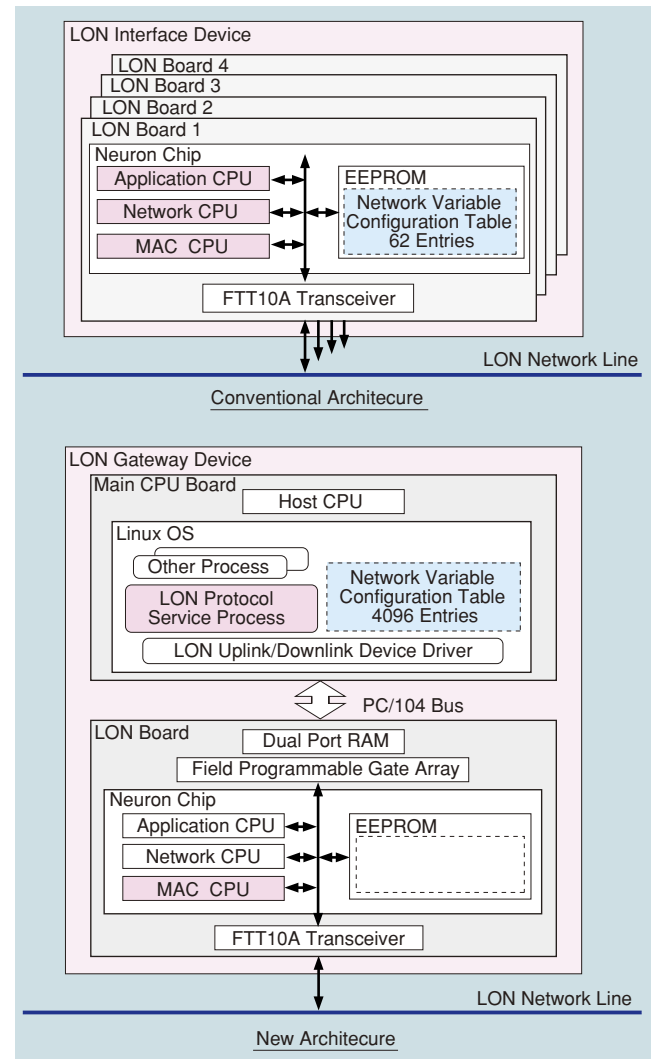


図 2 Host-Based アーキテクチャ
Neuron Chip 内の機能を高速 CPU に移行して高速実行させる。

CPU) と、ネットワーク変数の送信宛先などバインド情報を内蔵 EEPROM 内に持つ Network Variable Configuration Table をそのまま使用していた。

新アーキテクチャでは Host-Based 方式を採用した。この方式では、Neuron Chip 内蔵の 3 個の CPU のうち Network CPU と Application CPU の機能を Host CPU 側に移行させて、Neuron Chip 内には MAC CPU の Media Access Control 機能だけを残す。Neuron Chip は OSI 7 層モデルの 1 から 5 層までの機能である、Media Access Control、パケット衝突処理、Ack 返送、トランザクション再送処理などの機能を分担する。Host CPU は OSI モデルの 6、7 層に当たる、ネットワーク変数のアップデート処理とバインド情報管理、ネットワーク変数と他のアプリケーションとのデータ授受を担当する。

LON ボードとメイン CPU ボードとは PC/104 バスで接続することとした。PC/104 バスの転送能力は約 8 Mbps であり 78 kbps の LON 通信処理への応用と

しては十分である。Neuron Chip から Host CPU へのデータ転送制御は、マイコンではなくハードウェアロジックである FPGA により Dual Port RAM を介して高速転送される。メイン CPU ボード側ではオペレーティングシステムのデバイスドライバが LON 標準の Message Uplink/Downlink データ構造として上記メッセージを授受する。

この結果、従来、Neuron Chip 内部で低速の 8 ビット CPU で実行されていたネットワーク変数処理を高速な Host CPU 側に分担させることができるようになった。また、従来 Neuron Chip 内のメモリ容量が限定される EEPROM に 62 個しか定義できなかった Network Variable Configuration Table が Host CPU 側に定義できるので、メモリ容量の制限がなくなり、LON 規格上の上限である 4096 個という数のネットワーク変数が定義可能となった。

3. 2 Linux OS と CPU

従来は通信ゲートウェイのような装置の OS としては μ ITRON などの組み込み専用のものが使われてきた。しかし、複雑なデータベース管理や大量のファイル処理能力や IP ネットワークへの接続性などから Linux を組み込み用に使用する技術が研究されている²⁾。

本開発では後述のように WEB 通信や BACnet/IP 通信機能の共存を考慮してマルチタスクの高機能 OS として Linux と高性能 CPU の組合せを採用することにした。ただし、ここで技術的な課題は、OS を組み込み用としてコンパクトに ROM 化する技術である。本機種は、一般的な Linux のディストリビューションをそのまま ROM イメージとするのではなく、必要最小限で構成した Linux Kernel を圧縮してコンパクトフラッシュ (CF) ROM の限られたスペースに収めた。BIOS が起動後、CF ROM 内の Linux ディスクイメージ圧縮ファイルをメインメモリ上で展開して起動処理を完了させる。ここで、CF ROM は書き込み回数に制限があるので一時的なファイルを保持するための仮想ディスク Ramdisk をメインメモリ上に自動的に構築する方式とした。

また、組み込み型 OS に高機能な Linux を採用するため CPU には処理能力の高い x 86 系 CPU とすることとし、CPU 冷却ファンなしに 300 MHz で動作可能な Pentium MMX 互換の組み込み用 CPU を採用した。CF ROM は 64 MB、メインメモリは 64 MB を実装している。この ROM 化 Linux とファンレス組み込み用 CPU を採用したことにより、WEB 通信のための Apache サーバ実装や TCP/UDP/IP スタックを持つ Linux システムを実現しながら、ハードディスクや CPU 冷却ファンなど回転部品を排除すること

ができ、信頼性や寿命に大きく貢献した。

4. ソフトウェア設計

4. 1 プロトコルインターチェンジ

本機は LONWORKS のみならず、複数の異なるビル管理通信プロトコルを並行処理可能なマルチタスクソフトウェアとなっている。異なるプロトコルの複数ネットワークからばらばらに到着するメッセージ列を、Superlink コマンドに変換して同一空調機宛先ごとにまとめて転送する仕組みとして、“通信プロトコルインターチェンジ方式”を考案し特許出願した³⁾。

図 3 に通信プロトコルインターチェンジ方式により構成した Linux 上のタスク単位である Process を示す。ビル管理通信毎の別々の Protocol_Service_Process と、中核となる Protocol_Interchange_Process と、Superlink の通信チャンネル毎の Protocol_Service_Process が独立したタスクとして並行実行される。

Process 間のデータ授受方法は、2 種類の待ち行列 “Command_Queue” と “Notify_Queue” を持つ、我々独自の IPC (Inter Process Communication) クラスタライブラリとして、“Connector” クラスを開発した。通信プロトコルに依存するプロセスとしては

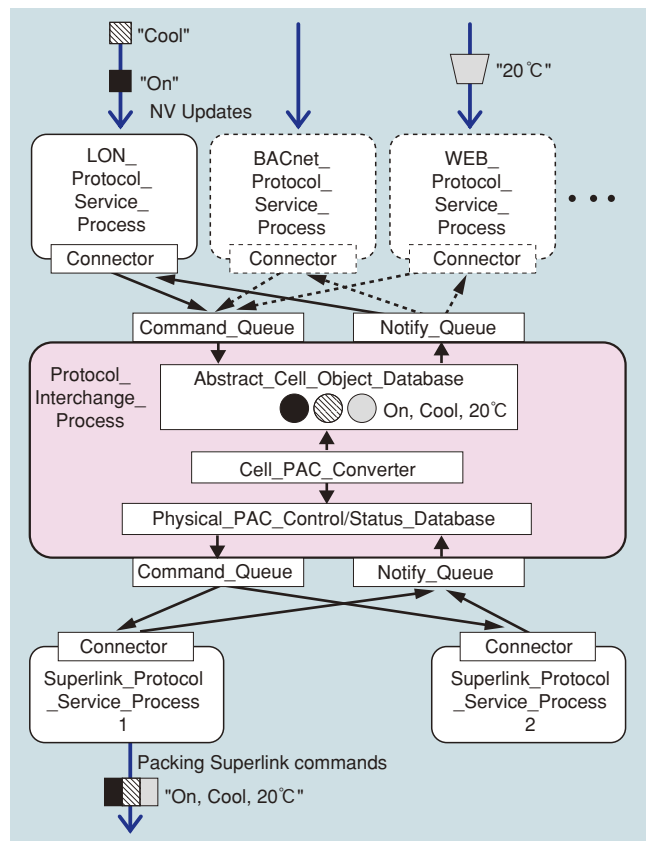


図3 通信プロトコルインターチェンジ
異なるプロトコルの複数のプロセスを並列実行させ空調機通信コマンドに合成変換する。

現在, LONWORKS 対応, BACnet/IP 対応, WEB 制御対応のものが用意されており, 用途により選択して Linux の起動スクリプトで起動される。これら Protocol_Service_Process はいつでも何個でも動的に Connector により接続/切離可能である。Connector が使う Command_Queue, Notify_Queue に授受する IPC メッセージは宛先プロセスを特定するため Process_Identifier を添付しての Linux OS の標準 POSIX ライブラリである Message Queue API にて受渡しされる。

中核の Protocol_Interchange_Process は通信プロトコルに依存しない形で空調制御指令/状態表示データを抽象化した “Abstract_Cell_Object_Database” を持つ。これは、実際の空調機の機種構成にかかわらずビル管理システムからみた論理的な空調管理単位を “Abstract_Cell” と定義したものであり、一つ一つの Cell のインスタンスは運転状態、運転モードといったプロパティを持つ。

一方、空調機側の Superlink_Protocol_Service_Process も同様に Superlink チャネル毎に Protocol_Interchange_Process とアクセスする。“Cell_PAC_Converter” とは、論理的な Abstract_Cell から物理的な Superlink 制御コマンドに変換する OS 上の並列実行単位スレッドである。この変換により、複数の空調機をグルーピングして抽象的な制御監視単位として Abstract_Cell とすることも可能である。

本開発で考案した通信プロトコルインターチェンジ方式の長所は、複数の通信プロトコルからばらばらの空調機制御指令を、首尾一貫した抽象的空調機としてのまとまった動作状態に変換してから伝達することである。単純に個別の各通信プロトコルプロセスからのメッセージを到着順に空調機側に変換するだけだと、あい矛盾する空調制御コマンドの組合せを一台の空調機に送ってしまうといった問題が発生する。この方式によれば、Abstract_Cell で整理されて同一空調機への空調機コマンドを矛盾なくまとめることが可能となる。

また、Cell_PAC_Converter スレッドにより実機空調機ごとにまとめて Superlink 制御コマンドが合成されるので、複数ビル管理通信路からの同一空調機向けのメッセージが一つの Superlink 通信パケットにパッキングされて送られるため、空調機通信側の伝送効率が格段に向上する。

4. 2 Air-con Cell Functional Block

本機は 1 250 個もの大量のネットワーク変数を持つので、それらを Functional Block として構造化して実装する方法を検討した。ネットワーク変数を平坦に

配置しただけでは LONMaker ネットワークバインドツール上ひとつ Virtual Functional Block として扱われししまうので、画面上に 1 250 個のすべてのネットワーク変数が表示されてしまうなどの不便がある。

図 4 に本機が持つ 96 個の “Air-con Cell Functional Block” を示す。それぞれは空調機の制御監視機能に対応する。この構造化により、LONMaker などのバインドツールの GUI 画面上でその時点のバインド作業に必要なネットワーク変数を Functional Block ごとに画面表示させることが可能となった。

上記 96 個の Air-con Cell Functional Block とは別に空調設備全体に対応する Functional Block が 1 個定義してあり、空調システム全体緊急停止・状態表示という 2 個のネットワーク変数を設けた。これは、例えば緊急時に、空調機全台を一括停止させ手元リモコンを操作禁止にロックする機能である。これにより、空調機停止とリモコン操作禁止の 2 種類を 96 台宛の 192 回のネットワーク変数メッセージを送る必要がなく、1 回のメッセージ通信ですむ。火災などの緊急時は各設備の緊急メッセージがバースト的に集中発生するので、このネットワーク変数により通信トラフィックが劇的に緩和されると高い評価を受けている。

Neuron Chip 内蔵のネットワーク変数をそのまま使用する初歩的なアーキテクチャでは、LON 開発ツールが装置定義ファイルである XIF ファイルを自動生成してくれる。しかし、本開発のように Host-Based アーキテクチャでは XIF ファイルが自動的に生成されるわけではない。今回は Echelon 社純正の NodeUtil 解析ツールを用いて上記 Functional Block

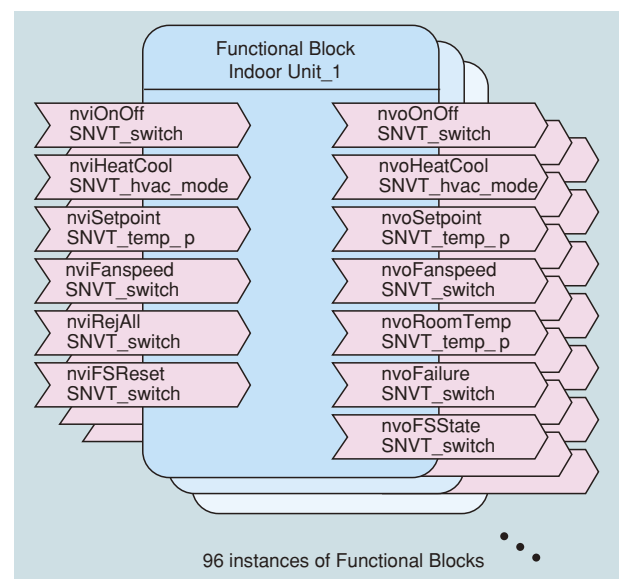


図 4 LON Functional Block
ネットワーク変数を室内機毎にまとめて構造化して実装。

を SD string にて生成する方式を取った。これには、XIF ファイル構成のため最も深いレベルでの LON システムの理解が必要であった。

5. 通信性能

5.1 通信性能評価の必要性

LONWORKS の伝送速度 78 kbps はオフィス LAN に比べ遅いとはいえ、前述のように Neuron Chip の処理能力が低いので受信したメッセージを高速に取り出すことがポイントである。本機から LONWORKS への送信は空調側でメッセージ間隔を調整できるが、受信は自ら間隔調整できないので受信バッファで受けることになる。

受信性能が不十分であると、受信応答のない Non-Acked タイプメッセージの場合は受信バッファフルによる溢れが発生してしまう。また、Acked タイプメッセージの場合でも LON ゲートウェイへの再送が頻繁となり、LON ネットワークチャネル時間の浪費となる。この対策としてむやみに受信バッファ段数を大きくすれば、本ゲートウェイ内での伝送遅れや、不用不急のメッセージがたまって緊急メッセージをブロックしてしまう "Priority Inversion" 問題が生ずる。

そこで、これまで本論文で述べてきた多数のネットワーク変数を高速処理するために開発した LON アーキテクチャと通信プロトコルインターチェンジ方式の効果を定量的に計量して従来機と比較評価した。

5.2 LON 通信性能試験

本ゲートウェイの LON メッセージの最高受信速度を計測した。Neuron Chip からメイン CPU ボードにメッセージを取りだす速さを純粋に評価するため、受信バッファは最悪値 1 段とした。また、LON メッセージを生成して本ゲートウェイに送信する相手側送信装置としては、最高速度を得る目的で Pentium 4 / 3 GHz のマシンの PCI バスに LON ボードを接続して LON 専用のファームウェアである LNS (LON Network operating System) 上で高速連続送信を目指した。

本機側の受信成功メッセージ数の計測は LOYTEC 社の高速 LON プロトコルアナライザを使用して 1 (μ s) の分解能で計測した。また、パケットロス有無は Echelon 社の解析ツール "NodeUtil" にて分析評価した。送信装置からのネットワーク変数の書き込みである NV Update メッセージとそれに対する本機からの Ack 返送を 1 Transaction とし、1 秒あたりのトランザクションレートを計測した。

試験結果は、図 5 に示すように、従来機種では 42 (Transactions/s) であったが、本ゲートウェイでは

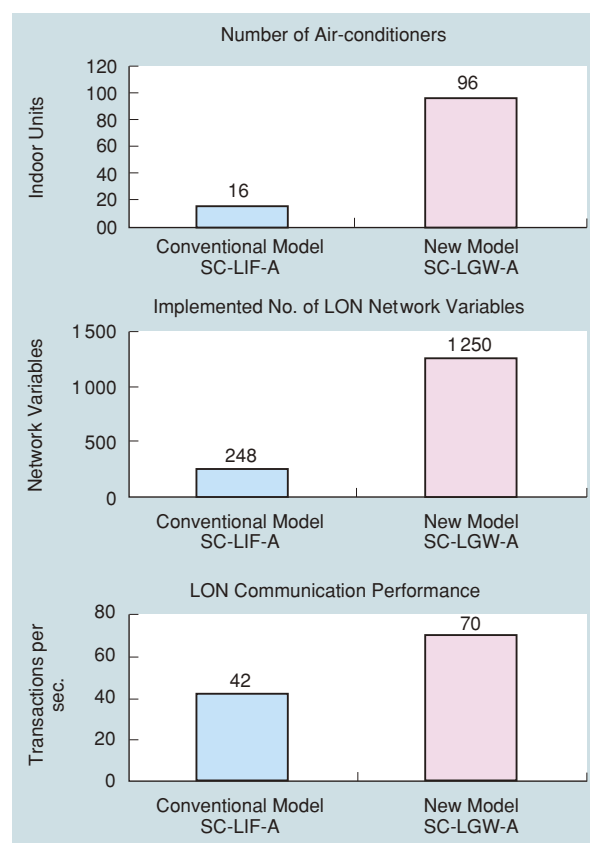


図5 性能ベンチマーク
空調機管理台数、ネットワーク変数、通信速度ともに従来機を大幅に上回る。

70 (Transactions/s) の結果が得られた。ただし、この試験では送信装置がこの速度で頭打ちとなったのでこれ以上の試験ができなかった。本ゲートウェイはすべて Ack を一発回答しており、本機の実力はまだ受信性能に余力がみられた。通信性能の限界測定ができなかったので、通信性能限界値を種々の資料から考察した。

5.3 通信性能限界の考察

LON の通信プロトコルである LonTalk の公式規格 ANSI/EIA-709.1 の Annex C によると、トランスポート層からみた TPDU (Transport Protocol Data Unit) 伝送率理論値は、

$$R_{TMAX} = \frac{R_{BPS} \cdot [1 - (1/(2 \cdot W_{BASE}) + P_E)] \cdot [1 - C_{COST} \cdot (1/(2 \cdot W_{BASE}) + P_E)]}{[\beta_1 + \beta_2 \cdot (D_{MEAN} + D_{PRI}) + L_{AVG}]}$$

で与えられる⁽⁴⁾。ここで、各パラメータは今回の試験に対応する以下の値を使った。伝送路ビットレートは $R_{BPS} = 78$ (kbps)、ランダムスロット数は $W_{BASE} = 16$ 、伝送エラーレートは $P_E = 0.01$ 、パケット衝突損失係数は $C_{COST} = 2$ 、フレーム間スペース長は $\beta_1 = 58$ (bits)、単位スロット長は $\beta_2 = 11$ (bits)、平均送信デレイスロット数は $D_{MEAN} = W_{BASE} / 2 = 8$ 、プライオリティスロット数は $D_{PRI} = 0$ 、平均物理層

フレーム長は NV Update と ACK の平均でプリアンブルも含め $L_{AVG} = 120$ (bits) とした。その結果、理論限界は $R_{TMAX} = 268$ (TPDUs/s) との結果となった。

ネットワーク変数の UP Date と Ack の 1 往復を 1 Transaction と数えるので、伝送チャンネル上のトランザクションレート理論限界としては $268/2 = 134$ (Transactions/s) である。これは上記試験データ 70 (Transactions/s) を十分上回る値であり、通信チャンネルとしてはまだ余裕があるので、限界は通信チャンネルではなくノード内部の処理時間ということが分かった。

Host-Based アーキテクチャにおける Neuron Chip が Host CPU へメッセージを転送する速度は Echelon 社の資料によると、本パラメータ使用時に近い場合は 103 (Transactions/s) とされている⁽⁵⁾。これからすると、Uplink/Downlink も限界ではなくまだ他にオーバヘッドがあるか、あるいは今回は計測できなかったが、この 103 (Transactions/s) に近い実力であるかのいずれかであろう。

正確な比較条件ではないが、他社のパッケージエアコン用 LON ゲートウェイの性能と比較してみると、カタログベースでは 50 (Transactions/s) の製品がみられるが、そのレベルに対しては十分上回っていると思われる。

6. ま と め

本論文では、パッケージエアコン用として世界最大の管理台数 96 台で、かつ、高速通信性能を持つ LON 通信ゲートウェイ開発を紹介した。これを実現した

技術は、LON 専用プロセッサ Neuron Chip を通信コプロセッサとし高速ホスト CPU で大容量のネットワーク変数群を処理するアーキテクチャと、当社独自の通信プロトコルインターチェンジソフトウェアであり、従来機の 42 に対し 1.7 倍の 70 (Transactions/s) という高速通信性能を達成した。

今後は、複数の異なる通信プロトコルの並列処理が可能な通信プロトコルインターチェンジ方式を生かして、LONWORKS, BACnet/IP, WEB 通信を同時処理する通信ゲートウェイ商品に発展させたい。

参 考 文 献

- (1) 蜷川忠三ほか、次世代ビル管理システム対応パッケージエアコン用通信装置、三菱重工技報、Vol.39 No.2 (2002) p.72
- (2) Choi, B.W.et al., Web-Based Monitoring and Control for BAS Using Multi-Protocol Converter with Embedded Linux, IEICE Transactions. Electron., Vol.E88-C, No.3 (2005) p.450
- (3) 蜷川忠三, “通信プロトコルインターチェンジ装置” 特願 2004-125710.
- (4) ANSI/EIA Standard EIA-709.1, Control Network Protocol Specification, Electronics Industries Alliance, Oct. (1999)
- (5) <http://www.echelon.com/support/documentation/datashts/23210.pdf>.



蜷川忠三