

超小型人工衛星CubeSat 地上局用TNCの開発

浅井 文男

Development of a Terminal Node Controller for Pico-Satellite/CubeSat Ground Station

Fumio ASAI

近年、世界各国の学生チームが超小型の人工衛星を設計・製作・運用するCubeSatプロジェクトに取り組んでいる。斬新な工学教育プログラムであるCubeSatプロジェクトを支援するためにはデータを取得するための地上局用ターミナルノードコントローラ（TNC）が必要である。本研究ではPICと呼ばれる汎用のワンチップマイクロコントローラを使用したTNCを開発した。このTNCには1200bpsのAX.25/SRLCプロトコルでCubeSatが送信するパケットテレメトリを取得するために必要なすべての機能が実装されている。このTNCはだれでも容易に製作することができるので、CubeSatプロジェクトの支援や無線データ通信技術教育の教材として活用できるものと期待される。

1. はじめに

近年、移動体通信や無線LANなどの爆発的な普及により無線データ通信分野の技術開発に携わる技術者や実務者の社会的な需要が増大している。このような状況を反映して、無線データ通信の急速な技術発展に対応した授業科目を開設する大学等の教育機関も増加している。しかし、技術の高度化とともに電子・情報・通信機器のブラックボックス化が進み、無線データ通信技術の原理や仕組みに対する自発的な学習活動は困難になりつつある。マルチメディア教材は無線データ通信技術の利用や応用に対する興味や関心を触発することはできても、理解の深化、技術の習得、問題解決能力の育成などには役立たない。ブラックボックス化が極限にまで達した感のある今日、学生の知的好奇心を喚起し自己学習力を活性化させる学習教材や教育方法の開発が求められている。

CubeSatプロジェクトは1999年に開催されたUniversity Space Systems Symposiumにおいてスタンフォード大学のRobert Twiggsが提案した斬新なアイデアに基づく工学教育プログラムである。日米を中心に世界中の大学の学生たちがチームを組んで一辺10cm、重量1kg以下の超小型人工衛星の設計・製作・運用し、各チームが目標に定めたミッションの達成を目指す活動を展開する。すでに東京大学と東京工業大学の学生チームがそれぞれ設計・開発したXI-IVとCUTE-Iが所定の

ミッションを達成し、CubeSatプロジェクトの教育効果と技術的な有効性が実証されている。今後、東大のXI-V、東工大のCUTE-1.7、日本大学のSEEDS、ビュルツブルグ大学のUWE-1などのCubeSatが次々と打ち上げられる予定である。

CubeSatはテレメトリなどのダウンリンクやコマンドのアップリンクにアマチュア無線周波数帯の電波を使用し、ダウンリンクの周波数、衛星の運用スケジュール、テレメトリのフォーマットなどを公開している。その利点を生かしてプロジェクトチームは世界中のアマチュア無線家や学生に衛星の監視や運用に不可欠なテレメトリを受信し、管制局に報告する支援活動呼びかけている。

CubeSatのテレメトリを取得するためにはターミナルノードコントローラ（TNC）と呼ばれる装置が必要になる。国内でTNCを製造販売しているメーカーは存在しないのでTNCの入手は難しいのが現状である。そこで本研究ではPICと呼ばれる汎用のワンチップマイクロコントローラを使用したTNCを開発した。このPIC-TNCには現在稼働中のCubeSatのテレメトリを取得するために必要なすべての機能が実装され、次期CubeSatに搭載される通信実験ミッションにも対応している。PIC-TNCはCubeSatプロジェクトの普及と支援を主要な目的とするが、無線データ通信技術の教材としても活用できる。

2. PIC-TNCの設計・開発

2. 1. ハードウェアの開発

CubeSatは公衆パケット交換網のCCITT X.25プロトコルに準拠して策定されたパケット無線用のリンク層プロトコルであるAX.25プロトコルの非番号制情報 (UI) フレームを使用してテレメトリを送信する。UIフレームは放送型のデータ伝送に使用され、FCSによる誤り検出は行われるがARQによる誤り制御は行われない。よって、CubeSat地上局用TNCには市販のTNCに使用されている高性能なCPUや大容量のROMとRAMは必要ない。そこで本研究ではPICと呼ばれるワンチップマイコンを採用した。PIC (Peripheral Interface Controller) はマイクロチップテクノロジーが開発した汎用の8ビットマイクロコントローラで、CPU、ROM、RAM、SIOなどがワンチップに統合されたデバイスである。ワンチップマイコンの選択肢としてはAVR、H8、R8C、78K0Sなども挙げられるが、入手の容易さや参考文献の豊富さで勝るPICを使用することにした。具体的にはROMが32キロワード、RAMが1536バイト、ハイエンドシリーズ、フラッシュメモリタイプ、DIPパッケージのPIC18F252-I/SPを選んだ。フラッシュメモリタイプは何度もプログラムの書き換えができ、また、DIPパッケージはブレッドボードやユニバーサル基板に容易に実装できるので、修正や改良、パラメータチューニング、試行錯誤などを伴う教材開発や学生実験には最適である。

CubeSatのテレメトリ送信に使用される標準的な変調方式は副搬送波周波数変調 (AFSK)、データレートは1200bpsでBell202規格に準拠している。モデムはDSPで実現する方法もあるが、本研究ではブラックボックス化を避けるため、あえてモデムチップを使うことにした。現在入手可能なBell202規格のモデムICにはCML MicrocircuitsのFX614と沖電気のMSM6947がある。本研究では3.3V~5Vの単一電源で動作する、外付け部品が少なく済む、無調整で動作するなどの利点を持つFX614を採用した。パソコンとのインターフェイス部には標準的なシリアル-TTLドライバ/レシーバであるMAX232と互換のADM232ANを使用した。設計したPIC-TNCの回路図を図1に示す。また、試作したPIC-TNCのブレッドボードモデルとユニバーサル基板モデルをそれぞれ図2と図3に示す。パソコンを接続しなくても受信パケットを確認できるようにするため液晶表示器 (LCD) を取り付けている。ユニバーサル基板モデルはシリアルポートを持たないノート型パソコンに接続して使用することを想定してADM232ANの代わりにシリ

アル-USB変換モジュールUSB-MOD1を使用している。

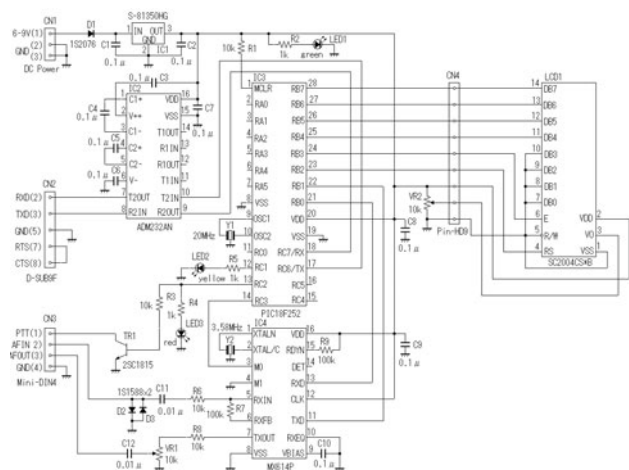


図1 PIC-TNCの回路図

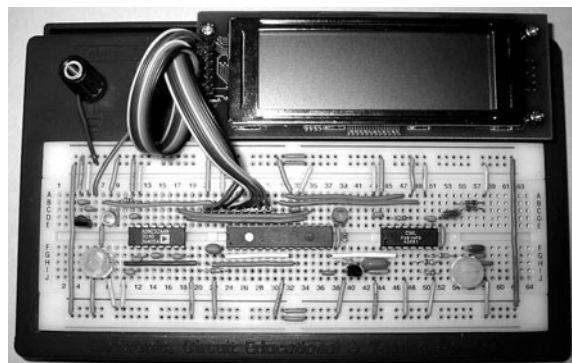


図2 PIC-TNCのブレッドボードモデル

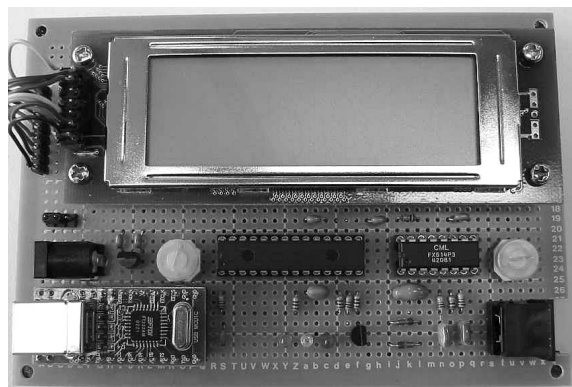


図3 PIC-TNCのユニバーサル基板モデル

2. 2. ファームウェアの開発

PICマイコンのファームウェア (プログラム) は専用の命令セットで構成されるアセンブリ言語以外に、C言語やBASIC言語で記述でき、それぞれプログラムの開発環境が用意されている。アセンブリ言語はマイクロチップテクノロジー純正の統合開発環境MPLABがフリーソフトとして提供されており、PICのアーキテクチャを学習するのに適しているが、プログラムのサイズが大きくなると移植や改良などが難しくなる。それに対してC

言語は標準的なプログラミングのスキルを習得していればアセンブリ言語よりも容易に汎用性や可読性の高いファームウェアのソースコードを記述できる。よって、本研究ではC言語を使用してTNCのファームウェアを作成することにした。採用した開発環境（Cコンパイラ）はCCS-C PCWHである。この開発環境は高価であるが、PICに内蔵されているさまざまなハードウェアモジュールを利用するための便利な組み込み関数を数多くサポートしている。John Hansenはこれらの組み込み関数を使用してフラグ検出、ゼロ挿入/削除、ビットシフト、CRC計算を含むUIフレーム処理、NRZIエンコード/デコード、シリアル通信など、TNCの主要な処理機能をC言語で簡潔にコーディングして公開している^{1),2)}。そこで本研究ではこれをベースにしてAX.25パケット送受信ファームウェアを作成することにした。そのアルゴリズムの概要を表すフローチャートを図4に示す。

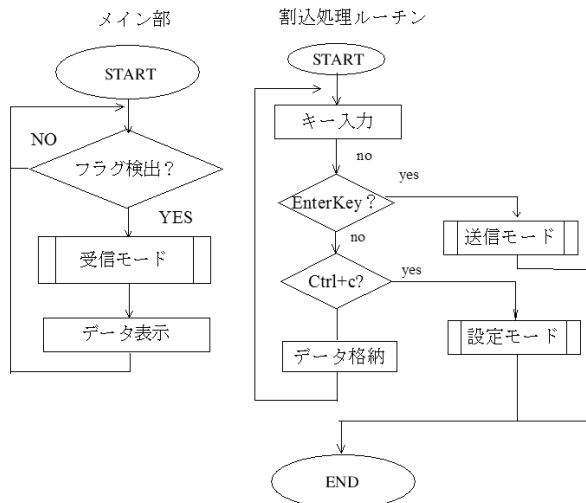


図4 AX.25送受信ファームウェア

2. 3. SRLLプロトコルへの対応

東工大のCubeSat/CUTE-1はAX.25プロトコルに加えてSimple Radio Link Layer (SRLL) と呼ばれる独自のプロトコルを使用してテレメトリを送信している。AX.25のUIフレームは誤りが発生すると破棄されるが、SRLLのフレームは誤りが発生してもFECにより訂正される。SRLLによるテレメトリ送信の実用性を評価するため、プロジェクトチームはルネサンステクノロジーのH8マイコンを使用した地上局用TNCを開発し、製作情報を公開してテレメトリの収集と性能評価実験への参加を呼びかけている。しかし、H8マイコンはフラットパッケージなので、マイコンチップを使用してTNCを製作するのは難しく、高価でオーバースペックな市販のマイコンボードを使用せざるを得ない。そこで本研究ではPIC-TNCでSRLLパケットを送受信するためのファ

ームウェアも開発することにした。

SRLL受信ファームウェアは公開されているH8-TNCのファームウェアのソースコードをほぼそのままPICに移植することで作成した。ファームウェアの動作概要を表すフローチャートを図5に示す。受信性能をH8-TNCと比較するため、H8-TNCと同じタイマー割り込みを使用して1200bpsのデータレートに同期させている。

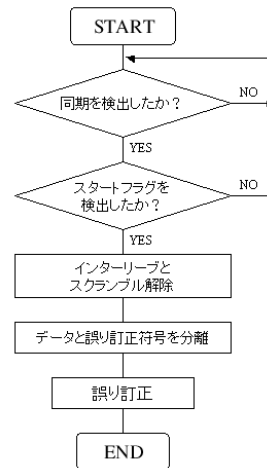


図5 SRLL受信ファームウェア

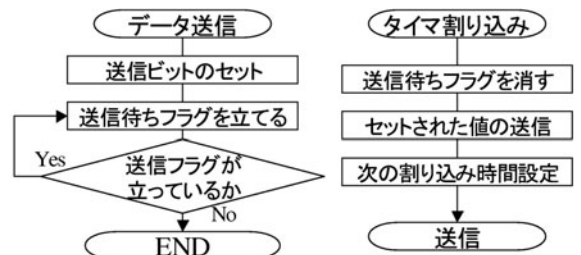


図6 タイマー割り込み使用のアルゴリズム

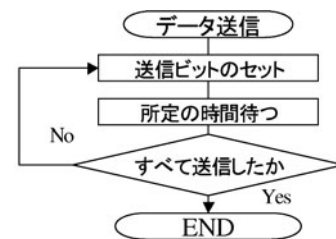


図7 遅延関数使用のアルゴリズム

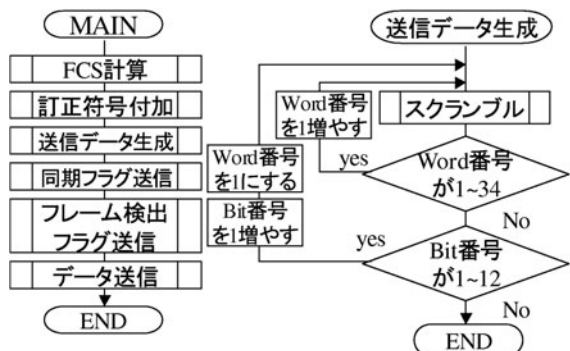


図8 SRLL送信ファームウェア

SRLL送信ファームウェアはSRLLプロトコルの仕様に基づいて作成した。送信ファームウェアでは受信ファームウェアと同じタイマー割り込みを使用するものと、AX.25のファームウェアに使用した遅延関数delay_us()を使用するものを作成し、性能を比較できるようにした。これらの同期アルゴリズムを表すフローチャートを図6と図7にそれぞれ示す。同期アルゴリズム以外の処理はどちらのファームウェアも同じで、キーボードから入力した任意のキャラクタデータを送信できる。その動作概要を表すフローチャートを図8に示す。SRLLの受信と送信のファームウェアはそれぞれ同期の最適化を図るパラメータチューニングをした後に、図4に示すAX.25送受信ファームウェアと同じアルゴリズムで統合した。

3. PIC-TNCの機能

開発したPIC-TNCには以下の機能を実装した。現在稼働しているCubeSatのテレメトリの取得には完全に対応している。東工大のCUTE-1.7のように一般の地上局からのアップリンクを受け付けるミッションを搭載するCubeSatが間もなく打ち上げられる。PIC-TNCに実装したパケット送信機能はこうした次期CubeSatのインタラクティブな通信実験に利用することを想定している。もちろん、移動体の位置情報などを無線中継するナビトラやAutomatic Position Reporting System (APRS) のような地上のパケット通信アプリケーションにも使用できる。

1) AX.25パケット送受信ファームウェア

・動作モード

- ①コンバースモード、②KISSモード
- ③コマンドモード

・受信機能

- ①I・UI・Sフレーム受信、②ナビトラデータ解読
- ③バイナリデータ16進数表示、④LCD表示

・送信機能

- ①UIフレーム送信 (キーボード入力文字)
- ②ビーコン送信、③デジピート

・パラメータ設定・動作切替機能

- ①アドレス (送信元、宛先、デジピート (2局まで))
- ②ボーレート、③TXDELAY、④PACLEN
- ⑤デジピートON/OFF、⑥ビーコンON/OFF
- ⑦ビーコンインターバル、⑧ビーコンメッセージ
- ⑨ASCII/HEX表示切替、⑩動作モード切替

2) SRLLパケット送受信ファームウェア

- ・SRLLパケット受信 (H8-TNCと同じ解読機能を含む)
- ・SRLLパケット送信 (キーボード入力文字)

4. PIC-TNCの性能評価

4. 1. SRLLパケット受信性能

MDに録音した3パス/約25分間にわたるCUTE-IのSRLLパケットの信号音を再生し、PIC1-TNCとH8-TNCでそれぞれ解読し、受信成功と誤り訂正に関する性能評価実験を行った。実験結果を表1と表2に示す。受信フレーム総数や誤り訂正成功率の比較から、PIC1-TNCのほうがH8-TNCよりも受信性能がよいことわかる。

表1 受信性能に関する実験結果1

	H8-TNC	PIC-TNC
受信フレーム総数:L	461	495
誤り訂正だけある:M	21	32
誤り訂正とCRC不一致:N	57	6

表2 受信性能に関する実験結果2

	H8-TNC	PIC-TNC
誤り訂正成功フレーム数=M	21	32
誤り訂正成功率=M/(M+N)%	27	84
誤り訂正最大ビット数	6	7

4. 2. SRLLパケット送信性能

CUTE-Iのテレメトリと同じ32バイトのデータを500パケット送信し (100パケット連続送信を5回)、H8-TNCで受信・解読できたパケット数を比較する性能評価実験を行った。実験結果を表3に示す。平均値の比較から、タイマー割り込みを使用した同期アルゴリズムのほうが遅延関数を使用した同期アルゴリズムよりも送信成功率が高いことがわかる。また、同期をとるためにSRLLパケットに付加するフラグはCUTE-1で採用されている80バイトよりも小さくすると送信成功率が高くなることも判明した。しかし、あまり小さくすると無線機の送受信切替 (PTT) 遅延によりパケットの頭切れが発生するので40バイト程度が適当であると考えられる。

表3 送信性能に関する実験結果

フラグ長 バイト数	遅延関数使用版			割り込み使用版		
	最大	平均	最小	最大	平均	最小
20	—	50%以下	—	—	—	—
40	99	98	97	100	98	97
60	98	97	96	98	96	95
80	98	92	86	95	93	89
100	79	75	68	90	87	82

5. おわりに

本研究ではPICと呼ばれる汎用のワンチップマイクロコントローラを使用したCubeSat地上局用のTNCを開発し、テレメトリの取得に対する実用性を確かめた。このTNCにはCubeSatが送信する1200bpsのAX.25プロトコルとSRLPプロトコルのパケットテレメトリを取得するために必要なすべての機能が実装されている。また、次期CubeSatに搭載される通信実験にも対応している。このTNCはブレッドボードやユニバーサル基板を使用すればだれでも容易に製作することができるので、CubeSatプロジェクトの支援や無線データ通信技術教育の教材として活用できるものと期待される。

謝 辞

本研究は平成16～18年度科学研究費補助金（課題番号16500570）、東京工業大学理工学振興会教育研究助成、東大阪宇宙開発協同組合奨学寄付金の支援を受けて行われた。また、大西浩司、金光健次、辻岡勇治、小西郁江、田部博之の各氏にはファームウェアの開発や性能評価実験で協力を得た。これらの支援や協力に感謝します。

参考文献

- 1) John A. Hansen, PIC-et Radio: How to Send AX.25 UI Frames Using Inexpensive PIC Microprocessors, 17th ARRL and TAPR Digital Communications Conference Proceedings, pp.29-37, (1998).
- 2) John A. Hansen, PIC-et Radio II: How to Receive AX.25 UI Frames Using Inexpensive PIC Microcontrollers, 19th ARRL and TAPR Digital Communications Conference Proceedings, pp.67-74, (2000).

