

超小型人工衛星 CubeSat 地上局用 TNC の開発 II

浅井 文男

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

Fumio ASAI

斬新な工学教育プログラムである CubeSat プロジェクトに参加するには CubeSat の送信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。昨年度の研究では汎用のワンチップマイクロコントローラを使用した PIC-TNC を開発した。本研究では現在稼働中の XI-IV、XI-V および CUTE- I のテレメトリを PIC-TNC でリアルタイムに解読するためのファームウェアを作成した。また、今年 9 月に打ち上げられた HIT-SAT のテレメトリを取得するために必要なデモジュレータを試作し、実用性を確かめた。これらのソフトやハードは CubeSat プロジェクトの推進に貢献するとともに、工学実験などの教材としても活用できるものとする。

1. はじめに

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。東京大学と東京工業大学の学生チームが設計・開発した世界初の超小型人工衛星 CubeSat の XI-IV と CUTE- I は 2003 年 6 月に打ち上げられ、ともに所定のミッションを達成することで CubeSat プロジェクトの有効性を実証した。また、XI-IV と CUTE- I の後継機である XI-V と CUTE-1.7+APD も打ち上げおよび定常運用と初期運用にそれぞれ成功している。2006 年 7 月、日本大学の学生チームが開発した SEEDS を含む 14 機の CubeSat は残念ながらロケット打ち上げに失敗したが、9 月には北海道工業大学と北海道大学の学生チームが共同開発した HIT-SAT が打ち上げられ、初期運用が行われている。今日、CubeSat プロジェクトは工学教育の枠組みを超え、衛星関連新技術の実用化や宇宙ビジネスの立ち上げなども視野に入れた産官学連携プロジェクトにまで成長し、国内に限っても特色あるミッショ

ンを搭載した東大の PRISM、東工大の CUTE-1.7+APD II、日大の SEEDS 2 号機、九州大学の QSAT、創価大学の Excelsior、香川大学の STARS- I、都立産業技術高等専門学校の KKS-1 などの開発が進められている。

CubeSat には姿勢制御、データ処理、通信、電源管理など、さまざまな衛星コンポーネントが搭載され、これらの衛星コンポーネントにはマイクロコントローラ(マイコン)が組み込まれている。よって、CubeSat はロボットと同様、マイコンシステム設計やマイコンプログラミングの観点からも魅力ある工学教育の教材になる。しかし、CubeSat の設計・開発には相応の設備や資金、 manpower が必要であり、小規模校の研究室がチャレンジすることは容易でない。そこで、CubeSat が送信するテレメトリを教材化することで学生たちが間接的に CubeSat プロジェクトに参加し、知的好奇心の喚起とマイコンシステム設計やマイコンプログラミングを体験できる教育実践を試みている。昨年度の研究ではワンチップマイクロコントローラを使用した PIC-TNC のハードウェアを設計・開発し、基本ファームウェアを作成した¹⁾。今年度はまず最初に、XI-IV、XI-V および CUTE- I のテレメトリを PIC-TNC でリアルタイムに解読するためのファームウェアを作成した。次に今年 9 月に打ち上げられた HIT-SAT のテレメトリを取得するために必要なデモジュレータを試作し、それぞれ実用性を評価した。

2. PIC-TNCの概要

2.1 ハードウェア構成

CubeSatが送信するテレメトリはアマチュア無線周波数帯の電波を使用して送信されるため、だれでも容易に受信し、解読することができる。テレメトリはモールス符号(CWデータ)とAX.25プロトコルのUIフレーム(パケットデータ)で送信される。パケットテレメトリを受信するためにはターミナルノードコントローラ(TNC)と呼ばれる装置が不可欠である。しかし国内でTNCを製造販売しているメーカーは存在しない。そこで、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(PIC-TNC)を設計・開発した。

ワンチップマイコンの選択肢としてはAVR、H8、R8C、78K0Sなども候補に挙げられるが、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。具体的にはフラッシュメモリタイプで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で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学生実験などには最適である。パケットテレメトリの復調に必要なBell202規格のモデムは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単機能のモデムチップを使うことにした。具体的には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CML社のFX614Pを採用した。

2.2 基本ファームウェア

マイコンには固有の命令セットが定められており、これに準拠したアセンブリ言語でファームウェアを開発すればアーキテクチャの理解も深められる。しかし、現在では汎用性と移植性に優れたC言語によるファームウェア開発が主流になっている。よって、PIC-TNCのファームウェアはC言語で作成し、マイコンプログラミングのスキルアップを図れるようにした。採用した開発環境(Cコンパイラ)はCCS社のCCS-C(PCWH)である。John HansenはCCS-Cを使用してPIC16FマイコンでAX.25 UIフレームを受信するために必要なプロトコル処理機能をコーディングして公開している²⁾³⁾。本研究ではJohn HansenのコードをPIC18F252に移植してPIC-TNC用のAX.25 UIフレーム送受信ファームウェアを作成した。

東工大のCUTE-1はAX.25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。本研究ではPIC-TNC用のSRLLパケット送受信ファームウェアも作成することにした。SRLL受信ファームウェアは東工大チームが開発し、公開しているH8/Tinyマイコンを使用したTNCのファームウェアのソースコードをほぼそのままPIC18F252に移植することで作成した。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独自に作成した。

3. テレメトリ解読ファームウェア

3.1 リアルタイム解読の必要性

CubeSatはどれも高度約600～800kmの低軌道を周回するので、管制局が衛星のデータを受信したり衛星にアクセスできる時間は1パスあたり最長でも15分程度に限られる。この問題を克服するため、世界各地に展開する管制局や地上局をインターネットで接続し、ワールドワイドにCubeSatの遠隔操作やダウンリンクデータの共有などを実現する地上局ネットワーク(GSN)の構築が進められており、CubeSatの地上局設備を備える浅井研究室も来年度にはGSNに参加する予定である。

CubeSatの開発チームはそれぞれテレメトリ解読ソフトを作成し、GSN構築のために無償で提供している。しかし、これらのテレメトリ解読ソフトにはリアルタイム解読機能が実装されていない。よって、テレメトリの解読により衛星搭載機器の動作状況や動作環境を知るためには、まず、ハイパーターミナルのような通信端末ソフトでパケットデータを受信してファイル保存した後、テレメトリデータを手作業で切り出してテレメトリ解読ソフトに入力するという手間のかかる作業が必要になる。これではCubeSatの短い可視時間を有効に利用することができない。衛星の可視範囲に入った地上局がパケットデータを受信すると同時にテレメトリを解読し管制局に通知すれば、管制局は直ちに衛星の動作状況や動作環境がわかり、画像データのダウンロードの可否などを素早く判断して当該地上局を適切に遠隔制御することができるようになる。東大および東工大の管制局はテレメトリのフォーマットや換算式などを公開している。これらの情報に基づいてXI-IV、XI-VおよびCUTE-Iのパケットデータをそれぞれ処理し、テレメトリの解読結果を出力する機能をPIC-TNCのファームウェアに実装した。

3.2 解読結果の比較

1)XI-IVの場合

表 1 XI-IV ステータスデータの解読結果の比較

データの受信日時：2004年7月27日 解読データ：xic0130ab4e4Vc3ffI0009S00002800004fT5c5f5a5a5c4a5c58 7187b8			
PIC-TNC の解読結果		Status Decoder Ver.11 の解読結果	
XI-IV内部時刻	701668	XI-IV 内部時刻	701668
バッテリー電圧	3.6V	バッテリー電圧	4.1V
太陽電池電圧	4.7C	太陽電池電圧	5.4V
充電電流	0.0mA	充電電流	0.0mA
通信系電流	35.2mA	通信系電流	39.7mA
太陽電池電流		太陽電池電流	
+X面	0.0mA	+X面	0.0mA
-X面	-3.6mA	-X面	0.0mA
+Y面	49.9mA	+Y面	56.1mA
-Y面	-0.1mA	-Y面	0.0mA
+Z面	-7.8mA	+Z面	0.0mA
-Z面	111.0mA	-Z面	124.8mA
衛星温度		衛星温度	
+X面	-12.5℃	+X面	22.2℃
-X面	-10.0℃	-X面	25.1℃
+Y面	-15.2℃	+Y面	19.4℃
-Y面	-13.1℃	-Y面	21.7℃
+Z面	-12.4℃	+Z面	22.0℃
-Z面	-24.8℃	-Z面	8.8℃
バッテリー	-11.8℃	バッテリー	23.1℃
送信機	-14.3℃	送信機	20.4℃
その他のステータス		その他のステータス	
テレメROMモード	粗		
カメラROM上書き禁止フラグ			
flag ROM1	0		
flag ROM2	0		
flag ROM3	0		
flag ROM4	1		
flag ROM5	1		
flag ROM6	1		
flag ROM7	0		
アップリンク回数	7	アップリンク回数	7/31
カメラ撮影回数	4	カメラ撮影回数	4/7
通信系SEL回数	0	通信系SEL回数	0/7
アンテナ展開	展開完了	アンテナ展開	展開完了
CW duty比	0.3以上	CW duty比	0.3以上
OBCリセット要因	通常	OBCリセット要因	通常
バッテリー充電状況	トリクル充電中	バッテリー充電状況	トリクル充電中

PIC-TNC と東大管制局提供の解読ソフト Status Decoder によるステータスデータの解読結果の比較を表 1 に示す。デジタルステータスデータの解読結果は完全に一致しているが、衛星温度の解読結果は PIC-TNC の数値がどれも Status Decoder の数値よりも 30 ほど小さい。また、太陽電池電流の解読結果もかなり異なる項目がある。これらの不一致について東大管制局に問い合わせたところ、Status Decoder では修正された換算式が使用されていることが判明し、PIC-TNC の解読結果はアナログデータに関しても妥当であることが確認できた。

2) XI-V の場合

PIC-TNC と東大管制局提供の解読ソフト Status Decoder によるステータスデータの解読結果の比較を表 2 に示す。デジタルステータスデータに関しては両者の解読結果は完全に一致しており、また、アナログデータの解読結果もほぼ一致している。しかし、太陽電池電流

は PIC-TNC の数値が小さい項目の Status Decoder の数値がどれも 0 になっている。この点について東大管制局から Status Decoder が計算結果を丸めているためとの回答があり、PIC-TNC の解読結果はアナログデータに関しても妥当であることが確認できた。

3) CUTE- I の場合

PIC-TNC と東工大管制局提供の解読ソフト CUTE-1 FM Packet Analyzer による AX.25 ステータスデータ・フレーム 1 の解読結果の比較を表 3 に示す。ヘッダ情報とデジタルステータスデータはすべての項目について解読結果が一致しており、アナログデータも数値の僅かな違いを無視すれば、Temp Gyro 2 の項目を除いて解読結果は一致している。この不一致を除けば PIC-TNC の解読結果は妥当であると言える。SRLL ステータスデータ・フレーム 1 の解読結果を表 4 に示す。フレーム 0 の解読結果については、ヘッダ情報とデジタルステータス

表2 XI-Vステータスデータの解読結果の比較

データの受信日時：2006年3月22日			
解読データ：xic013c5d83eVe741I3205S13010110010dT9095888b92838887 ffa2b8010			
PIC-TNC の解読結果		Status Decoder Ver.12 の解読結果	
衛星内部時刻	12965950	OBC時刻	12965950
蓄電池電圧[V]	4.0	電池電圧(BattV)	4.076
太陽電池電圧[V]	4.5	太陽電池電圧(SolarV)	4.594
充電電流[mA]	88.2	充電電流(CHGI)	88.2
通信系電流[mA]	34.5	通信系電流(CDCI)	34.6
太陽電池電流[mA]			
+X面	48.2	太陽電池電流(+X面)	48.2
-X面	4.7	太陽電池電流(-X面)	0
+Y面	4.1	太陽電池電流(+Y面)	0
-Y面	41.1	太陽電池電流(-Y面)	41.2
+Z面	4.5	太陽電池電流(+Z面)	0
-Z面	36.4	太陽電池電流(-Z面)	36.4
衛星温度[°C]			
+X面	19.3	温度(+X面)	19.3
-X面	22.0	温度(-X面)	22
+Y面	13.8	温度(+Y面)	13.9
-Y面	15.0	温度(-Y面)	15
+Z面	20.9	温度(+Z面)	20.9
-Z面	11.1	温度(-Z面)	11.2
蓄電池	13.7	温度(電池)	13.7
送信機	11.3	温度(無線機)	11.4
テレメROMモード	粗	テレメROMモード	粗履歴
カメラROM1上書き	禁止	上書きフラグ(ROM1)	上書き禁止
カメラROM2上書き	禁止	上書きフラグ(ROM2)	上書き禁止
カメラROM3上書き	禁止	上書きフラグ(ROM3)	上書き禁止
カメラROM4上書き	禁止	上書きフラグ(ROM4)	上書き禁止
カメラROM5上書き	禁止	上書きフラグ(ROM5)	上書き禁止
カメラROM6上書き	禁止	上書きフラグ(ROM6)	上書き禁止
カメラROM7上書き	禁止	上書きフラグ(ROM7)	上書き禁止
アップリンク回数	2	アップリンクカウンタ	2
カメラ撮影回数	5	カメラカウンタ	5
SELリセット回数	0	SELカウンタ	0
アンテナ展開	完了	アンテナ展開	展開済み
CWデューティ比	0.3以上	CWデューティ比	デフォルト以上
OBCリセット要因	通常	起動要因	通常起動
充電状況	停止	充電状況	充電停止
カメラ	OFF	カメラ	OFF

データはすべての項目において解読結果は一致するが、S-Meterと電圧関係の項目を除くアナログデータは解読結果は一致しない。これは換算式が異なるためと思われる。

4. HIT-SATデモジュレータ

北海道工業大学と北海道大学の学生チームが共同開発したHIT-SATは姿勢制御のミッションデータをテレメトリとともに送信している。データの変調方式はBell202規格であるが、伝送方式は無手順の調歩同期方式を採用しているため市販のTNCやPIC-TNCでは受信できない。道工大の管制局はFX614を使用したデモジュレータの回路図を公開しているが、シリアルインターフェイス(COMポート)に接続するタイプなので不便である。そこで、USBモジュールを使用したデモジュレータを試作した。その回路図と写真を図1と図2に示す。使用したUSBモジュール(USB-MOD1)は28ピンのDIPパッケージ

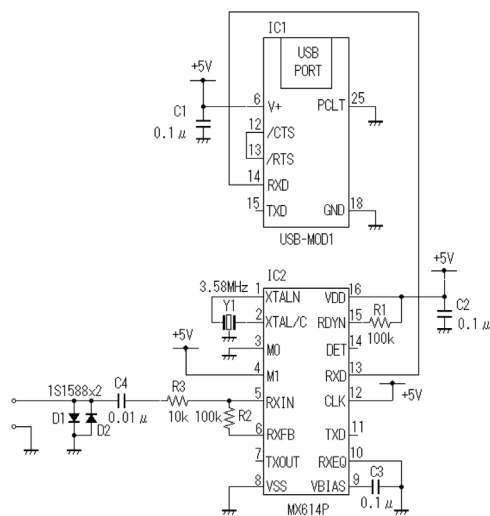


図1 HIT-SATデモジュレータの回路図

表3 CUTE- I AX.25 ステータデータの解読結果

PIC-TNC の解読結果		CUTE-1 FM Packet Analyzer Ver.1.0 の解読結果	
パケットの受信日時：2003年7月13日			
解読データ：JQ1YCY>JQ1YCYZ-3:00 A7 1D AE 5F 01 EF EF00 00 03 59 00 C0 A8 BF B1 BD B7 B8 BF C0 C1 00 9F B4 98 B0 90 7E 00			
Satellite Time	1095210.9	//////// Header //////////	
Packet Number	95	Satellite Time: 1095211.0 sec	[0x0A71DAE (Byte 16-19)]
Frame Number	1	Packet Number: 95	[0x5F (Byte 20)]
Test Flag	0	Frame Number: 1	[0x1 (Byte 21) & 0x01]
Operating Mode	0	Test Flag: Wired Prohibit	[0x1 (Byte 21) & 0x02]
Memory Status	0	Operation Mode: TNC Monitor	[0x1 (Byte 21) & 0x04]
Packet Interval	2	Memory Status: No Access	[0x1 (Byte 21) & 0x18]
		Packet Interval: 2 sec	[0x1 (Byte 21) & 0xE0]
		//////// Frame 1 //////////	
SRAM Memory Area	0	SRAM Memory Area: 0	[0x0 (Byte 24)]
SRAM Memory Point	0	SRAM Memory Point: 0	[0x0 (Byte 25)]
Frame 0 Sampling Rate	10.0	Frame 0 Sampling Rate: 10.0000 Hz	[0x3 (Byte 26)&0xf0]
Frame 1 Sampling Rate	1.0	Frame 1 Sampling Rate: 1.0000 Hz	[0x3 (Byte 26)&0x0f]
Left FM Time	890	Left FM Time: 890 sec	[0x59 (Byte 27)]
Temp Gyro 1	12.0	Temp. Gyro 1: 12.0 deg	[0xA8 (Byte 30)]
Temp Gyro 2	1.9	Temp. Gyro 2: 12.0 deg	[0xBF (Byte 31)]
Temp Acc 1	11.6	Temp. Acc 1: 11.6 deg	[0xB1 (Byte 32)]
Temp Acc 2	2.3	Temp. Acc 2: 2.4 deg	[0xBD (Byte 33)]
Temp Wall 0	1.4	Temp. Wall 0: 1.5 deg	[0xB7 (Byte 34)]
Temp Wall 1	0.6	Temp. Wall 1: 0.6 deg	[0xB8 (Byte 35)]
Temp Wall 2	-2.6	Temp. Wall 2: -2.7 deg	[0xBF (Byte 36)]
Temp Wall 3	1.6	Temp. Wall 3: 1.7 deg	[0xC0 (Byte 37)]
Temp Wall 4	-3.6	Temp. Wall 4: -3.6 deg	[0xC1 (Byte 38)]
Temp Wall 5	87.7	Temp. Wall 5: 87.7 deg	[0x0 (Byte 39)]
Temp Power 1	11.8	Temp. Power 1: 11.8 deg	[0x9F (Byte 40)]
Temp Power 2	19.2	Temp. Power 2: 19.2 deg	[0x90 (Byte 44)]
Temp OBC	14.9	Temp. OBC: 14.9 deg	[0x98 (Byte 42)]
Temp Comm	3.0	Temp. Comm.: 3.0 deg	[0xB0 (Byte 43)]
Temp Battery	2.0	Temp. Battery: 2.1 deg	[0xB4 (Byte 41)]
Reference Voltage	3.03	Reference Voltage: 3.0438 V	[0x7E (Byte 45)]
Reset Count	0	Reset Count: 0	[0x0 (Byte 46)]
TNC Error	0	TNC Error: 0	[0x0 (Byte 47)]
Sun Sensor 1	0x00	Sun Sensor:	[0x0, 0xC0 (Byte 28, 29)]
Sun Sensor 2	0xC0		

ジなのでデモジュレータの製作は容易であり、ドライバをインストールすればノートパソコンでも使用できるので非常に便利である。試作したデモジュレータを使用して HIT-SAT の FM データを解読した結果の一部(8フレーム)を以下に示す。これはスマートメディアに保存されている DHU センサデータの 16 進数表示であるが、換算式を使用すれば電池の電圧・電流や筐体表面温度などの測定値が得られる。実用的な解読性能が得られたので今後はマイコンを搭載し、これらの測定値がリアルタイムで出力されるデモジュレータを開発したい。

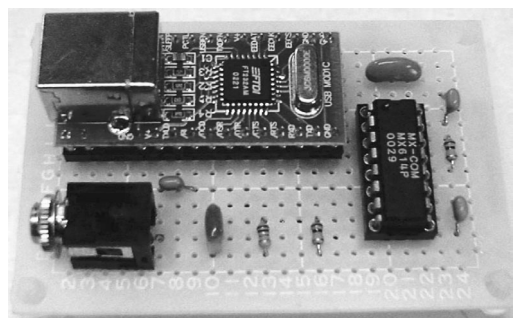


図2 試作した HIT-SAT デモジュレータ

~JR8YJTCA5020000004,0927200705,305,365,1B,376,346,387,B,2,8E,96,136,13A,129,135,12E,12B,123~
 ~JR8YJTCA5020000005,0927200735,305,368,9,379,347,389,21,1,8D,8C,131,130,12B,142,12A,122,123~
 ~JR8YJTCA5020000006,0927200805,305,368,3,379,347,388,1E,2,91,97,12B,131,130,134,125,11F,12C~
 ~JR8YJTCA5020000007,0927200835,305,363,25,36F,347,2

E3,7,2,81,7B,131,134,130,133,124,121,12B~
 ~JR8YJTCA5020000008,0927200905,306,367,3,376,348,2E2,19,2,A9,A7,133,131,126,133,12B,124,122~
 ~JR8YJTCA5020000009,0927200935,305,368,8,379,346,388,1F,2,96,96,131,132,131,133,12D,127,124~
 ~JR8YJTCA5020000010,0927201005,22F,366,C,376,346,38A,D,2,B4,B0,133,133,12F,133,12E,120,132A~
 ~JR8YJTCA5020000011,0927201035,22F,369,3,377,347,38B,16,2,8A,94,12D,12A,129,134,123,120,12E~

表4 CUTE-I SRLLステータデータの解読結果

データの受信日時：2004年7月25日	
CUTE-1 SRLL Raw Data :	
01 91 5F 4D 3F 21 EF EF 00 00 03 45 00 80 93 AB	
91 A8 B1 AD A1 A5 A9 00 8B A4 81 9B 89 71 7C 00	
CRC Calculated by CUTE-1 : B7 D3	
CRC calculated by PICTNC : B7 D3	
Corrected Bit Number : 5	

Satellite Time [s]	2630433.2
Packet Number	63
Frame Number	1
Test Flag	0
Operating Mode	0
Memory Status	0
Packet Interval	3
SRAM Memory Area	0
SRAM Memory Point	0
Frame 0 Rate [Hz]	10.0
Frame 1 Rate [Hz]	1.0
Left FM Time [s]	690
Temp Gyro 1 [deg]	21.0
Temp Gyro 2 [deg]	10.4
Temp Acc 1 [deg]	24.9
Temp Acc 2 [deg]	11.5
Temp Wall 0 [deg]	4.2
Temp Wall 1 [deg]	5.7
Temp Wall 2 [deg]	11.1
Temp Wall 3 [deg]	11.8
Temp Wall 4 [deg]	7.7
Temp Wall 5 [deg]	87.7
Temp Power 1 [deg]	20.9
Temp Power 2 [deg]	22.4
Temp OBC [deg]	25.1
Temp Comm [deg]	12.9
Temp Battery [deg]	9.3
Reference Volt [V]	2.71
Reset Count	124
TNC Error	0
Sun Sensor 1	0x00
Sun Sensor 2	0x80

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)の支援を受けて行われた。また、池山亮、橋本一輝、円子武の各氏にはファームウェアの開発で協力を得た。これらの支援や協力に感謝します。

参考文献

- 1) 浅井文男,超小型人工衛星CubeSat地上局用TNCの開発,奈良工業高等専門学校研究紀要,Vol.41,pp.73-77, (2006).
- 2) 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).
- 3) 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).