

TELEMETRICKÁ MĚŘENÍ V LETECTVÍ

Ing. Jiří T á m a

Výzkumný a zkušební letecký ústav

Praha - Letňany

Ing. Jiří Tůma
VZLÚ Praha

Telemetrická měření v letectví

Telemetrie je moderním prostředkem letecké měřicí techniky. Pro řešení rozsáhlých a technicky i časově náročných úkolů jsou využívány komplexní automatické měřicí soustavy s telemetrickým přenosem. Bylo vyvinuto mnoho systémů lišících se vybavením a účelem použití.

Jsou používány dvě základní metody: analogová a číslicová. Je používána frekvenční modulace (FM), pulsně amplitudová modulace (PAM) a nejčastěji pulsně kódová modulace (PCM).

V referátu jsou uvedeny příklady řešení soustav a jejich částí, jsou uvedeny příklady použití takových soustav.

V dalším vývoji lze předpokládat systematický rozvoj komplexních automatických telemetrických soustav. Lze předpokládat miniaturizaci, unifikaci a integrální řešení soustav. Lze předpokládat širší uplatnění telemetrie i v ostatních oborech.

Telemetrie představuje v letectví moderní prostředek měřicí techniky. Ve spojení s výkonnými počítači jsou vytvářeny komplexní automatické telemetrické měřicí soustavy. Bylo vyvíjeno mnoho systémů lišících se vybavením a účelem použití.

Prudký rozvoj a vysokou současnou úroveň telemetrických soustav umožnil převratný pokrok elektroniky v souvislosti s kosmickými programy se všemi souvislostmi a důsledky, protože telemetrie v nejširším smyslu slova tvoří základní předpoklad kosmických experimentů.

Telemetrické soustavy v letectví, využívané samozřejmě i v jiných oborech, procházely v nedávné době obdobím prudkého rozvoje jak soustav samotných, tak jejich využití. Zavedení telemetrických soustav znamená kvalitativně novou úroveň. Je třeba volit komplexní systémový přístup, věnovat pozornost nejen části vlastního přenosu dat, ale stejně tak části sběru dat a na druhé straně části jejich efektivního zpracování. Je požadováno zpracování v reálné čase experimentu. Ve speciálních případech je možné znát výsledky zkoušky nebo její části prakticky okamžitě. Zde jsou kladeny velké nároky na komplexnost zvládnutí úlohy jako celku, rozhodující vliv může hrát připravenost experimentu a pracovníků, kteří zkoušku sledují a posuzují její výsledky.

V klasickém pojetí bylo telemetrie využíváno pro sledování kritických letových stavů, kdy hlavním hlediskem bylo snížení počtu členů posádky ve snaze snížit riziko. Množství přenášených údajů - parametrů bylo velmi malé, což bylo dáno jednak tehdejšími technickými možnostmi a tím, že pracovníci v pozemním sledovacím středisku nebyli schopni současně účinně větší počet parametrů sledovat. Jednalo se převážně o sledování průběhu vybraných parametrů např. na obrazovce osciloskopu spolu s komentářem pilota.

U moderních telemetrických soustav, kdy je sledováno několik desítek nebo set parametrů, je samozřejmě základním předpokladem automatické zpracování dat. Reálný čas experimentu je dán časem potřebným pro vlastní zpracování výsledků a časem potřebným k jejich zhodnocení a rozhodnutí pro další experiment. Pozornost je třeba věnovat komplexnosti přípravy v hardwarové i softwarové části, tedy přípravě vlastního zařízení, programů i pracovníků.

Všeobecně jsou známy příklady z posledních let, kdy byly řešeny a vyřešeny četné obtížné situace a problémy při kosmických letech. Specialisté v pozemních střediscích byli schopni využít všech možností zapojené techniky k prospěchu věci tak, aby v "reálném čase" byla k dispozici optimální odpověď optimálního řešení. Obdobné případy byly řešeny i v letectví.

Při využití telemetrie v letectví se nemusí vždy jednat o vlastní letové zkoušky, ale např. o zkoušky modelů v aerodynamických tunelech, zkoušky ve speciálních zkušebnách. Při letových zkouškách letadel nejde v převážné většině o řešení kritických stavů, ale o měření určitého oboru, etapy nebo režimu letu. V první fázi zkoušek se jedná o zjištění všech potřebných charakteristik letounu, pohonných jednotek, systému a příslušenství. V další fázi se jedná o zkoušky ve smyslu průkazu výkonů a vlastností letounu ve všech sledovaných oblastech.

Hlavním sledovaným kriteriem je průběžná doba zkoušek. Pro zkrácení této doby lze využít právě komplexních měřicích soustav s telemetrickým přenosem. Na praktických příkladech lze ukázat, jak rozhodující vliv má použití takových soustav. Průběžné doby zkoušek se souběžným systematickým řešením vzniklých problémů a úprav jsou překvapivě malé. Přitom rozsah zkoušek a počet měřených parametrů je mnohem větší oproti klasickým postupům.

V dalším budou uvedeny základní metody a způsoby řešení.

Základním pravidlem je přeměna měřeného signálu na telemetrický bezprostředně u bodu měření. Tím je zamezeno vzniku dalších chyb, což je podstatné především u metody PCM. Důležitou vlastností telemetrických soustav je pružnost využití při možnosti změny místa měření.

Často bývá použito paralelního záznamu telemetrického signálu měřicím magnetofonem na palubě letounu.

Jsou používány v podstatě dvě metody pro přenos měřených dat: **analogová** a **číslíková**.

Analogová metoda. Každá měřená veličina má svůj vlastní kanál, kterým je přenášen signál úměrný měřené veličině. Je použito metody frekvenční modulace, amplitudové modulace nebo modulace šířkou pulsu.

Počet kanálů je omezen, metoda je tedy vhodná pro malé soustavy, pro měření několika parametrů. Přesnost při použití této metody je $\geq \pm 1 \%$.

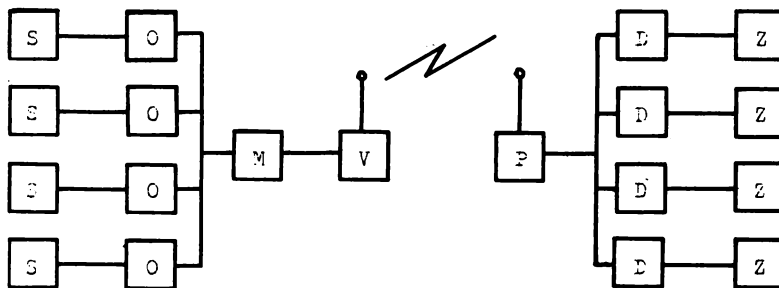
Číslicová metoda. Je použito techniky časově děleného multiplexu. Měřené veličiny jsou A/D převodníkem převedeny do číslicového tvaru a přeneseny jedním telemetrickým kanálem do pozemní stanice, kde jsou opět převedeny D/A převodníkem do jednotlivých analogových tvarů. Přesnost je $\leq \pm 1 \%$.

Analogový systém je levnější, číslicový je rychlejší. Číslicová metoda je vhodná pro více měřených parametrů, pro spojení s počítačem.

Frekvenční modulace - FM

Metoda frekvenční modulace je používána zvláště pro veličiny s velkým dynamickým rozsahem (vibrace, rázy, zrychlení apod.). Jedná se o paralelní přenos signálů.

Blokové schéma:



S = snímače měřených veličin

O = oscilátory

M = FM multiplex

V = vysílač

P = přijímač

D = multiplex,
diskriminátory

Z = zobrazení měř. veličin

Používá se pásem IRIG PBW nebo CBW.

Proporcionální šířka pásma (PBW): (Standard IRIG):

21 kanálů $\pm 7,5 \%$ v rozsahu 400 Hz až 165 kHz (kanály 1 až 21),

8 kanálů $\pm 15 \%$ v rozsahu 22 kHz až 165 kHz (kanály A až H).

Pozn.: Kanály A až H nelze použít současně s kanály 14 až 21. Viz lit. /2/.

Konstantní šířka pásma (CBW): (Standard IRIG):

21 kanálů \pm 2 kHz (kanály 1A až 21A),

10 kanálů \pm 4 kHz (kanály 3B až 21B),

6 kanálů \pm 8 kHz (kanály 3C až 23C).

Viz lit. /2/.

Pulsní amplitudová modulace - PAM

Metoda pulsní amplitudové modulace je používána v zařízeních pro sběr dat při velkém počtu měřených parametrů, není-li požadována zvýšená přesnost. Sestává z elektronického komutátoru na vysílací straně a synchronizátoru/dekomutátoru na přijímací straně.

Blokové schéma:



S = měřené signály
a synchronizace

K = komutátor PAM

v = vysílač

P = přijímač

D = synchronizátor,
dekomutátor

Z = zobrazení dat

Vysílací strana: všechna napětí ze snímačů měřených veličin jsou přepínána v pravidelné, cyklické sekvenci. Amplituda každého přepínaného vzorku je úměrná elektrickému napětí ze snímače v čase přepínání. Měřená amplituda je vždy mezi dvěma referenčními hodnotami v rozsahu 0 % a 100 %. Vložený synchronizační puls udává souřadnici rámce.

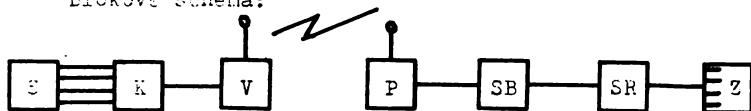
Používá se IRIG Standard RZ 50 %, nebo NRZ 100 % - viz lit /2/.

Přijímací strana: obsahuje synchronizátor PAM, který upravuje sekvenci PAM, detekuje vložený synchronizační kanál, kompenzuje odchylky amplitud vzhledem k referenčním hladinám 0 % a 100 % a převádí analogovou hodnotu kanálu do číslicového tvaru.

Pulsně kólová modulace - PCM

Metoda pulsně kólové modulace je nejčastěji používanou metodou, u které (podobně jako u PAM) jsou vzorky měřené veličiny postupně vzorkovány a převedeny do číslicového tvaru.

Blokové schéma:



S = střídavě měřených veličin

K = PCM kódování

V = vysílač

P = přijímač

SB = synchronizátor bitů

SR = synchronizátor rámců

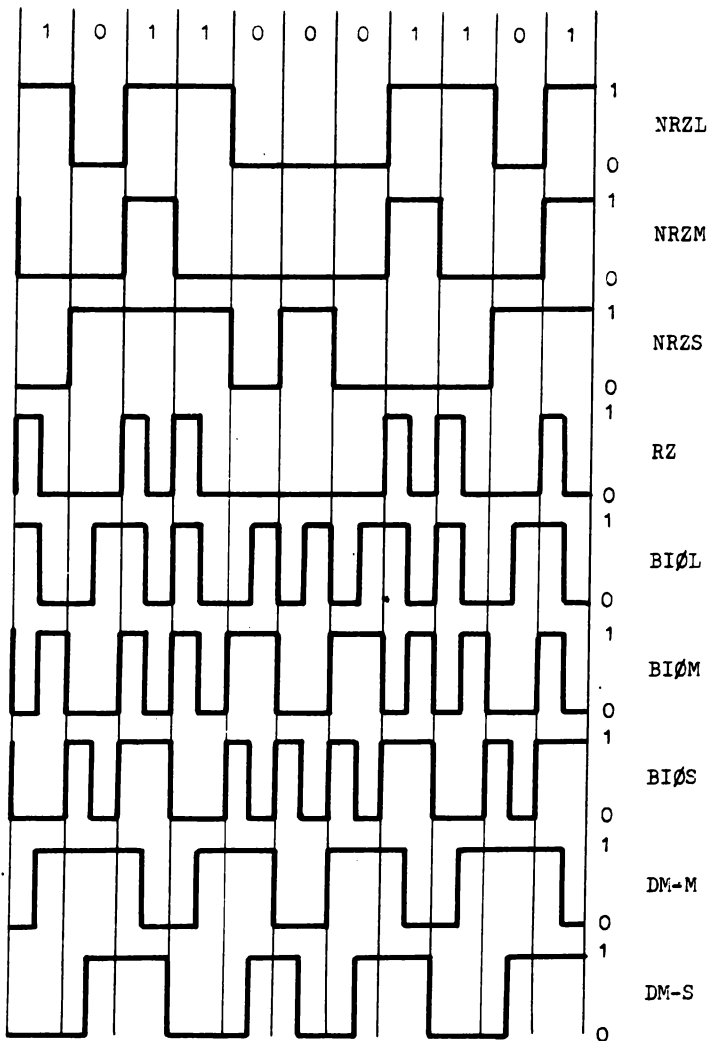
Z = zobrazení měřených dat

Vysílací strana. V kódovacím PCM zařízení se sbíraná data převádí do PCM sériového tvaru. Přepínač postupně přepíná různé analogové měřené veličiny; A/D převodník převádí každé analogové měření z přepínače do binárního paralelního tvaru; synchronizační registr ukládá synchronizační slova; kódovací registr převádí číslicová data z A/D převodníku do sériového tvaru pro vytvoření PCM signálu; hodinový signál jde do přepínače, převodníku a dalších registrů pro vytváření PCM signálu.

Přijímací strana. V synchronizátoru bitů je PCM signál dodávaný přijímačem tvarován a převeden do synchronizátoru rámců a měřicího magnetofonu podle příslušného kódu. Dodává signál hodin vytvářený při vysílání do synchronizátoru rámců.

Synchronizátor rámců zpracovává dodávaný PCM signál a porovnává ho s očekávaným programovaným tvarem signálu korelací.

Používané kódy PCM:



Příklady řešení

Všechny známé příklady řešení telemetrických soustav nebyly vyrobeny jednou firmou. Vždy se jedná o sestavení takových soustav (myšleno komplexních automatických měřicích soustav s telemetrickým přenosem) z dílčích celků různých specializovaných firem.

Dále jsou uvedeny některé příklady takových soustav, nebo jejich částí.

Příkladem číslicové telemetrické soustavy je řešení anglické firmy GEC-Ellicot Process Automation Ltd. "TELEPACE". Soustava má kapacitu stovek až tisíců kanálů. Celková přesnost zahrnující vliv zesílení, linearity, posuvu nuly a citlivosti byla $\pm 0,2\%$ z plného rozsahu. Viz lit. /1/.

Příklady moderních řešení jsou automatické soustavy pro letové zkoušky francouzské firmy Compteurs Schlumberger, instalované např. ve francouzském středisku letových zkoušek CEV, nebo rumunském středisku letových zkoušek - viz lit. /2/.

Dalšími příklady soustav firmy Schlumberger jsou: soustava pro evropský družicový systém instalovaná v západoněmeckém Bernstattu; soustava pro měření vibrací v družicích ESTEC; modulární soustava pro větší počet analogových vstupů vysoké úrovně plus několik číslicových vstupů ARIANE - viz lit. /2/; nebo soustavy TELESET a TELERIS - viz lit. /3/.

Pozn.: V lit. /2/ a /3/ jsou uvedeny ještě další příklady řešení.

Jako příklad současné generace číslicových zařízení pro sběr a řízení dat je možné uvést soustavu DAMIEN III francouzské firmy SPIM. Soustava slouží pro sběr číslicových, analogových (nízké i vysokofrekvenčních) parametrů, signálů z odporových snímačů, resolverů, přepínačů, kmitočtu, periody, atd. Soustava má modulární koncepci, plně standardizované vstupy. Lze tedy snadno měnit skupiny parametrů bez změny kabeláže. Soustava DAMIEN III umožňuje připojení 100 až 200 parametrů, rychlost přenosu je 64 až 8192 slov.s⁻¹. Sběr dat a tvoření přenosového signálu je řízeno programem. Soustava DAMIEN III používá metody PCM, může být připojena k palubnímu počítači. Viz lit. /4/ a /5/.

Příkladem moderní soustavy pro sběr dat s návazností na zařízení pro zpracování dat je PCM soustava ESSAI francouzské firmy Intertechnique, která umožňuje připojení až 128 kanálů. Moderně řešená modulární a programovatelná soustava je navržena pro použití v leteckých podmínkách - viz lit. /6/.

Zajímavým řešením je telemetrická PCM soustava západoněmecké firmy rfe Raumpfahrtlelektronik GmbH+Co. Jedná se o modulární PCM soustavu dodávanou ve třech verzích: rfe 200 Mini (až 16 kanálů), rfe 200 Midi (až 62 kanálů) a rfe 200 Maxi (až 1024 kanálů). Tyto miniaturní soustavy jsou určeny pro nejrůznější použití. Viz lit. /7/.

Anglická firma The Plessey Co.Ltd. dodává soustavu pro sběr dat pro letové zkoušky, umožňující připojení až 512 kanálů analogových nebo číslicových signálů s návazností na pozemní vyhodnocovací soustavu s počítačem - viz lit. /8/.

Příklady použití

Při letových zkouškách francouzských letounů řady Mirage bylo použito dvou nezávislých telemetrických soustav s počítačem IBM-1800 pro současné měření 300 až 500 parametrů. Bylo dosaženo 30 % úspory nákladů na letové zkoušky s předpokladem 50 % úspor v případě plného využití soustavy.

Při vývojových zkouškách francouzsko-západoněmeckého letounu Alpha Jet bylo použito telemetrické soustavy SAMUEL, což vedlo k tomu, že za 1 a 1/4 roku po vzletnutí prvního prototypu mohla být zaváděna sériová výroba. Bylo sledováno 250 parametrů, z nich 80 se přenášelo telemetricky. Této soustavy bylo použito i při zkouškách letounů Mirage, Mercure, Falcon 10 a Jaguar, ale také v USA při letových zkouškách letounu F-14, kde bylo dosaženo zkrácení dosud potřebné doby k takovým zkouškám o 40 %!

Při letových zkouškách prototypů letounu McDonnell Douglas DC-10 bylo použito soustavy s automatickým vyhodnocováním měření. Bylo měřeno 500 až 1000 parametrů. Použití soustavy umožnilo velmi intenzivní provoz a zkrácení celkové doby zkoušek. Výsledky jednotlivých zkoušek byly k dispozici skutečně v reálném čase experimentu. Použití této soustavy je příkladem komplexního přístupu k dané úloze.

1. Závěr

Lze předpokládat, že bude pokračovat systematický rozvoj komplexních automatických telemetrických měřicích soustav. Bude využíváno zkušeností se soustavami pro zkoušky letadel a kosmické experimenty, především s využitím dalšího vývoje v technologii elektronických obvodů a vývoje počítačů. To umožní koncepční změny celých soustav i jejich částí, miniaturizaci a zavedení integrálních soustav a podsoustav (např. bezdrátový přenos z jednotlivých podsoustav v odleh-
lých částech letounů apod. do hlavní telemetrické (vysílací) jednotky).
Dosaovaná rozšířenost řešení bude nahrazována unifikovanými celky.

Lze jistě předpokládat, že telemetrické soustavy nebo jejich části najdou postupně uplatnění i v ostatních oborech.

Literatura

- /1/ White G.: The Acquisition of Measurement Data by Telemetry; Acta IMEKO 1973; str. 781 až 789.
- /2/ Telemetry, Condensed Catalogue; firma Schlumberger.
- /3/ Instruments and Systems, 1975-1976 Catalogue; firma Schlumberger.
- /4/ Data Acquisition System DAMIEN III; prospekt firmy SFIM /D 71/73/.
- /5/ Measurement Recording System for Flight Test DAMIEN III; prospekt firmy SFIM.
- /6/ ESSAI, Standard Equipments for Data Monitoring and Acquisition; prospekt firmy Intertechnique.
- /7/ rfe Telemetrie; prospekty rfe 200 Mini, rfe 200 Midi, rfe 200 Maxi firmy rfe RaumfahrtElektronik GmbH+Co., Telemetriesysteme.
- /8/ Digital Data Acquisition Systems for Flight Test; prospekty firmy The Plessey Co.Ltd.