

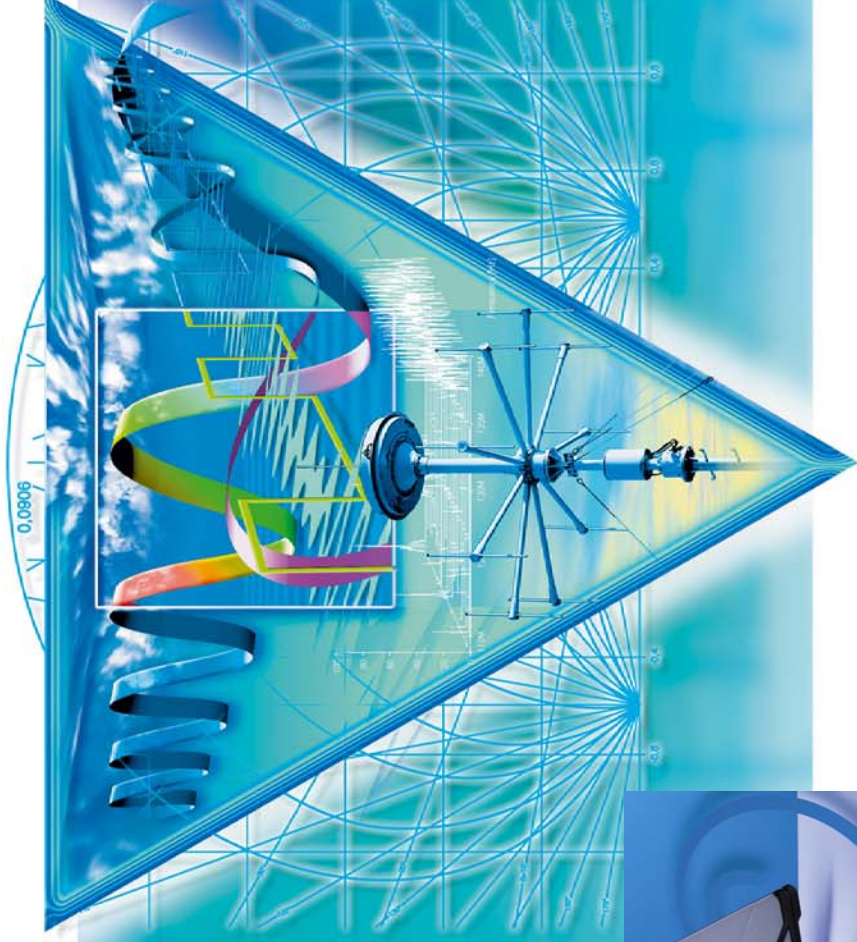
Aufgabenstellung Fallstudienwettbewerb 2007

„Get the Signals“

Spectrum Monitoring and Direction Finding
Systems

Finale

Design of a Spectrum Monitoring System



Einleitung

In einem modernen Funküberwachungsempfänger werden die von der Antenne kommenden Signale mittels eines so genannten „Downconverters“ oder „Frontends“ selektiert und auf eine geeignete, fest stehende Zwischenfrequenz umgesetzt. Dort erfolgt eine Analog-Digital-Wandlung. Die Kanalfilterung und die Demodulation geschieht mittels digitaler Signalverarbeitung. Der Downconverter arbeitet nach dem bekannten Superheterodyn-Prinzip. Die dafür benötigten Lokal-Oszillatoren (LO) werden von einer geeigneten Synthesizer-Baugruppe erzeugt.

Aufgabenstellung

Entwerfen Sie ein Konzept für den Signalzug eines solchen Frontends vom Antennenanschluss bis zum A/D-Wandler.

- ◆ Machen Sie sich mit der Aufgabenstellung anhand der ausgehändigten Beschreibung vertraut. Beachten Sie vor allem die gegebenen Randbedingungen und Vereinfachungen.
- ◆ Entwerfen Sie ein Datenblatt, in dem Sie die wichtigsten von Ihnen entworfenen Empfängerparameter angeben.
- ◆ Entwerfen Sie ein Blockschaltbild Ihres Empfängers und kennzeichnen Sie die einzelnen Funktionsblöcke. Begründen Sie die Wahl Ihrer Bauelemente.
- ◆ Entwerfen Sie einen Pegelplan für den geforderten Frequenzbereich Ihres Empfängers.

Empfängeranforderungen

◆ Frequenzbereich	30 MHz ... 3 GHz
◆ Max. Signalbandbreite	10 MHz
◆ Eingangsfrequenz für den A/D-Wandler	21,4 MHz
◆ Rauschmaß	< 12 dB
◆ Eingangs-IP3	> -5 dBm
◆ Eingangs-IP2	> 40 dBm
◆ Phasenrauschen	< -105 dBc/Hz @ 10kHz
◆ LO-Pegel an der Antennenbuchse	< -107 dBm (0 dB μ V)
◆ Alias-Unterdrückung am ADC	< 90 dB
◆ Spiegelfrequenz-Unterdrückung	> 60 dB
◆ Max. messbarer Eingangsspegel	> -40 dBm
◆ Leistungsaufnahme	< 3 W
◆ Bauteilekosten	< 100 €

Tipps

- ◆ Lesen Sie sich die gegebenen Tipps und Hinweise in der schriftlichen Aufgabenstellung sorgfältig durch
- ◆ Fragen Sie die Betreuer bei Unklarheiten

Viel Erfolg!

HINFÜHRUNG ZUR AUFGABENSTELLUNG

Entwicklung eines Empfänger-Frontends

In einem modernen Funküberwachungsempfänger werden die von der Antenne kommenden Signale mittels eines sogenannten „Downconverters“ oder „Frontends“ selektiert und auf eine geeignete, fest stehende Zwischenfrequenz umgesetzt. Dort erfolgt eine Analog-Digital-Wandlung. Die Kanalfilterung und die Demodulation geschieht mittels digitaler Signalverarbeitung. Der Downconverter arbeitet nach dem bekannten Superheterodyn-Prinzip. Die dafür benötigten Lokal-Oszillatoren (LO) werden von einer geeigneten Synthesizer-Baugruppe erzeugt.

Folgende Aufgabe hat Ihr Team

Entwerfen Sie ein Konzept für den Signalzug eines solchen Downconverters vom Antennenanschluß bis zum AD-Wandler. Es steht Ihnen dafür eine Palette von vorgegebenen Funktionsblöcken mit definierten Parametern zur Verfügung. Aus diesen Blöcken wählen Sie die für Ihre Anwendung geeigneten aus. Sie können sie in beliebiger Anzahl verwenden. Bei den angegebenen Funktionsblöcken handelt es sich um fiktive Bauelemente, deren Parameter real existierenden Bauteilen nachempfunden sind. Sie wurden jedoch stark vereinfacht und idealisiert. Wie in einem realen Entwicklungsprojekt gibt es auch hier für den Downconverter bestimmte technische Anforderungen. Diesen Anforderungen soll Ihr Entwurf durch geeignete Konzeption und geschickte Auswahl von Bauteilen gerecht werden. Ihre Aufgabe umfaßt nur den Entwurf des analogen Downconverters samt AD-Wandler. Achten Sie beim Entwurf auch auf Kosten und Leistungsaufnahme. Die digitale Weiterverarbeitung der Signale nach dem AD-Wandler fällt nicht in Ihren Aufgabenbereich, ebensowenig wie die Erzeugung der Lokal-Oszillatoren.

Anforderungen

Der Empfänger soll Signale im Frequenzbereich von 30 MHz bis 3 GHz empfangen können. Es sollen Signale mit bis zu 10 MHz Bandbreite empfangen werden können. Das Produktmarketing berichtet von einem neuen Konkurrenzprodukt, das im gleichen Frequenzbereich eine Rauschmaß von 12dB, einen Eingangs-IP3 von -5dBm und einen Eingangs-IP2 von 40 dBm aufweist. Bezüglich Rauschmaß, IP3 und IP2 sollte Ihr Konzept besser sein. Versuchen Sie auch, die anderen unten genannten Anforderungen einzuhalten. Sie sind in der Reihenfolge ihrer Priorität aufgelistet. Vergessen Sie nicht, die Bauteilekosten und die Leistungsaufnahme im Auge zu behalten.

Frequenzbereich:	30 MHz ... 3 GHz
Max. Signalbandbreite:	10 MHz
Eingangsfrequenz für den AD-Wandler:	21,4 MHz
Rauschmaß:	< 12 dB
Eingangs-IP3:	> -5 dBm
Eingangs-IP2:	> 40 dBm
Phasenrauschen:	< -105 dBc/Hz @ 10kHz
LO-Pegel an der Antennenbuchse:	< -107 dBm (0 dBμV)
Alias-Unterdrückung am ADC:	< 90 dB
Spiegelfrequenz-Unterdrückung:	> 60 dB
Max. meßbarer Eingangspegel:	> -40 dBm
Leistungsaufnahme:	< 3 W
Bauteilekosten:	< 100 €

Vereinfachungen

Störungen, die in der Realität im Signalzug durch Mischprodukte höherer Ordnung entstehen, sollen hier nicht berücksichtigt werden. Über die angegebenen Kenndaten hinaus sind alle Bauteile und Funktionsblöcke als ideal anzusehen. Im Downconverter soll auf die sonst übliche Pegelregelung zur Vergrößerung der Dynamik verzichtet werden.

Ergebnis

In der Präsentation Ihres Entwurfes müssen folgende Elemente enthalten sein:

- 1) Zeigen Sie ein Datenblatt für Ihren Entwurf. Listen Sie die Parameter auf, die in den Anforderungen genannt werden und geben Sie die Werte an, die Sie für Ihr Downconverter-Konzept errechnet haben. Zeigen Sie die Ergebnisse für Anfang und Ende des Frequenzbereiches, also für 30 MHz und 3 GHz.
- 2) Zeigen Sie das Blockschaltbild Ihres Entwurfs vom Antenneneingang bis zum AD-Wandler. Bitte kennzeichnen Sie die Typen der verwendeten Funktionsblöcke. Kennzeichnen Sie Signalfrequenzen, Filterbandbreiten und Frequenzbereiche. Erklären Sie die Funktionsweise und begründen Sie die Wahl der Bauteile. Erläutern Sie, wie Sie Ihre Datenblattwerte erreicht haben!
- 3) Zeigen Sie Ihre Pegelpläne für 30 MHz und 3 GHz (siehe Abschnitt Hinweise / Tips).

Hinweise / Tipps zur Vorgehensweise

- 1) **Machen Sie sich im Team zunächst mit den Anforderungen und den gegebenen Bauteilen vertraut. Klären Sie die Bedeutung von Parametern, die Ihnen unbekannt sind.**
- 2) **Prüfen Sie wichtige Randbedingungen, die Einfluß auf Ihr Gesamtkonzept haben: Welche Filter stehen Ihnen zu Verfügung? Verfügen die Filter über ausreichend Dämpfung im Sperrbereich? Sind die Flanken der Filter steil genug um unerwünschte Signale nahe am Durchlaßbereich ausreichend zu dämpfen? Welche Abtastrate ist für den AD-Wandler erforderlich? Berücksichtigen Sie die Signalbandbreite und das Nyquist-Kriterium.**
- 3) **Skizzieren Sie ein mögliches Konzept als Blockschaltbild. Überlegen Sie sich, wie viele und welche Zwischenfrequenzen sie benötigen. Welche Selektion ist in den Zwischenfrequenzen notwendig? Prüfen Sie, ob eine Vorselektion nötig ist. Berücksichtigen Sie beim Entwurf des Konzeptes unbedingt die Anforderungen an Spiegelfrequenz-Unterdrückung, ZF-Unterdrückung, Anti-Aliasing, unerwünschte LO-Abstrahlung und IP2. Bedenken Sie, daß die Signale von Lokaloszillatoren von den Mischern nicht vollständig unterdrückt werden.**
- 4) **Bestimmen Sie, welche Lokaloszillator-Frequenzen für Ihr Konzept notwendig sind. Berücksichtigen Sie dabei auch das Phasenrauschen der Lokaloszillatoren, das mit zunehmender Frequenz größer wird.**
- 5) **Erstellen Sie mit einem Tabellenkalkulationsprogramm (z.B. MS Excel) einen sogenannten Pegelplan. Das ist eine Liste, in der nacheinander vom Eingang bis zum Ausgang sämtliche Funktionsblöcke in der Signalkette aufgelistet sind. Geben Sie zu jedem Funktionsblock seine Verstärkung, sein Rauschmaß und seinen Eingangs-IP3 an. Berechnen Sie für jeden Funktionsblock die Gesamtverstärkung, das Gesamtrauschmaß und den Gesamt-IP3 vom Antenneneingang bis zum angegebenen Funktionsblock – jeweils bezogen auf den Antenneneingang. Sie benötigen hierfür die Formeln für die Verkettung von Rauschmaß, IP3 und Verstärkung. Unterscheiden Sie beim Umgang mit Intercept-Punkten und 1dB-Kompressionspunkten sorgfältig, ob die Werte auf den Ausgang oder den Eingang bezogen sind! Rechnen Sie gegebenenfalls entsprechend um. Es steht Ihnen frei, auch weitere Kenndaten in ähnlicher Weise im Pegelplan zu erfassen. Welche Bauteile sind maßgeblich am IP2 beteiligt? Ist es sinnvoll, den IP2 weiter als bis zur ersten Zwischenfrequenz zu berechnen?**
- 6) **Setzen Sie in den Pegelplan nun die Parameter der Funktionsblöcke ein, die Sie verwenden wollen und beobachten Sie deren Auswirkungen auf Rauschmaß, IP3 und Pegelverlauf. Nutzen Sie den Pegelplan, um Ihre Signalkette im Hinblick auf die diese drei Parameter zu optimieren. Achten Sie auch darauf, daß die verwendeten Funktionsblöcke bei der maximal zulässigen Eingangsleistung nicht übersteuert werden! Die maximale Eingangsleistung soll lediglich durch den AD-Wandler begrenzt werden.**
- 7) **Überprüfen Sie, ob Ihr Entwurf auch alle anderen Anforderungen einhält und optimieren Sie entsprechend.**

Funktionsblöcke

Für den Entwurf Ihres Downconverters stehen Ihnen grundsätzlich folgende Funktionsblöcke zur Verfügung:

Mischer, Verstärker, Bandpaßfilter, Tiefpaßfilter, Hochpaßfilter, Signalschalter und AD-Wandler. Außerdem können Lokaloszillatoren beliebiger Frequenz und Leistung verwendet werden, lediglich deren Phasenrauschen ist parametrisiert.

Mischer

Typ		M01	M02	M03	M04	M05	M06
f_{RF}	GHz	0...3	0...3	1,5...4,5	3...7	0,6...1,3	0,5 ... 2,5
f_{IF}	GHz	3...8	3...8	0...1,5	0...1,5	0...0,4	0...0,5
Conversion Loss	dB	8,5	6,5	10	7	8	6
IIP2	dBm	50	45	50	40	50	50
IIP3	dBm	20	13	18	11	14	20
Input P_{1dB}	dBm	10	10	10	1	6	14
Isolation LO-RF	dB	35	13	30	25	25	10
Isolation LO-IF	dB	35	20	27	23	15	10
LO-Pegel	dBm	15	13	17	7	10	0
Kosten	€	23,90	14,50	2,70	35,00	3,00	1,00
Leistungsumsatz (LO-Treiber)	mW	450	400	500	350	380	100

Die LO-Pegel sind lediglich zur Berechnung unerwünschter LO-Abstrahlung angegeben. Im Leistungsumsatz sind die benötigten LO-Treiber enthalten, die nicht Teil Ihres Entwurfs sind.

Verstärker

Typ		V01	V02	V03	V04	V05	V06	V07	V08
Frequenz	GHz	0,01...6	0,01...6	0,01...3	0,01...5	0,01...0,5	0,01...0,5	0,01...0,5	0,01...6
Gain @ 10 MHz	dB	22	12	10	15	20	13	20	17
@ 500 MHz									
@ 3 GHz									
@ 6 GHz									
NF	dB	2,0	5,5	1,6	3,5	2,0	2,5	3,5	2,0
OIP2	dBm	35	40	50	33	35	50	45	35
OIP3	dBm	24	26	36	18	25	38	35	25
Output P_{1dB}	dBm	12	12	21	6	12	18	16	10
Reverse Isolation	dB	22	16	10	19	22	19	21	24
Kosten	€	2,70	4,50	2,10	0,40	3,20	2,70	1,90	2,80
Leistungs-umsatz	mW	180	200	380	100	200	480	390	180

Die Verstärkung ist frequenzabhängig und hier nur an Stützwerten angegeben. Um die Verstärkung bei dazwischen liegenden Frequenzen zu ermitteln müssen Sie interpolieren. Zur Vereinfachung interpolieren Sie die dB-Werte einfach linear.

Schalter

Typ		SPDT	SP4T	SP6T
Bemerkung		1-aus-2 Umschalter	1-aus-4 Umschalter	1-aus-6 Umschalter
Frequenz	GHz	0,01...3	0,01...3	0,01...3
Insertion loss @ 10 MHz	dB	0,5	1	1,5
@ 3 GHz				
IIP2	dBm	60	50	50
IIP3	dBm	55	40	45
Input P_{1dB}	dBm	33	22	24
Isolation	dB	20	30	29
Kosten	€	1,00	2,80	3,40
Leistungs-umsatz	mW	1	1	1

Die Einfügedämpfung ist frequenzabhängig und hier nur an Stützwerten angegeben. Um die Verstärkung bei dazwischen liegenden Frequenzen zu ermitteln müssen Sie interpolieren. Zur Vereinfachung interpolieren Sie die dB-Werte einfach linear.

LC-Bandpass-Filter mit Bandbreite 10 MHz

Bei niedrigen Frequenzen lassen sich geeignete Bandfilter aus diskreten LC-Kreisen anfertigen. Die Güte der verfügbaren Induktivitäten ist aber begrenzt, so daß mit zunehmender Frequenz die Einfügedämpfung steigt und die Ordnung der Filter nicht beliebig erhöht werden kann. Beachten Sie auch, daß die Sperrdämpfung von Filtern allgemein nicht beliebig groß ist. Folgende Tabellen zeigen vereinfachte Kenndaten für typische Bandpaßfilter der Bandbreite 10 MHz für verschiedene Bereiche der Mittenfrequenz. Zur Definition der Flankensteilheit sind die Filterbandbreiten bei verschiedenen Dämpfungen angegeben. Dazwischen werde linear interpoliert. Der Übertragungsbereich des Filters sei symmetrisch um die Mittenfrequenz. Für die weitere Arbeit kann es hilfreich sein, sich die Filterkurve schematisch zu skizzieren.

Frequenzbereich 15...80 MHz		Frequenzbereich 80...200 MHz		Frequenzbereich 200...400 MHz	
Insertion Loss	1 dB	Insertion Loss	3 dB	Insertion Loss	5 dB
-0,5 dB Bandbreite	10 MHz	-0,5 dB Bandbreite	10 MHz	-0,5 dB Bandbreite	10 MHz
-20 dB Bandbreite	20 MHz	-20 dB Bandbreite	30 MHz	-20 dB Bandbreite	50 MHz
-60 dB Bandbreite	30 MHz	-50 dB Bandbreite	50 MHz	-50 dB Bandbreite	80 MHz
Sperrdämpfung	60 dB	Sperrdämpfung	50 dB	Sperrdämpfung	50 dB
Kosten	4 €	Kosten	4 €	Kosten	4 €

Keramische Bandpaß-Filter mit Bandbreite 10 MHz

Für höhere Frequenzen lassen sich schmalbandige Filter aus Keramikresonatoren mit hoher Güte herstellen. Folgende Tabelle zeigt vereinfachte Kenndaten für typische, keramische Bandpaßfilter der Bandbreite 10 MHz. Zur Definition der Flankensteilheit sind die Filterbandbreiten bei verschiedenen Dämpfungen angegeben. Dazwischen werde linear interpoliert. Der Übertragungsbereich des Filters sei symmetrisch um die Mittenfrequenz. Für die weitere Arbeit kann es hilfreich sein, sich die Filterkurve schematisch zu skizzieren. Die Einfügedämpfung ist Frequenzabhängig und hier nur an Stützwerten angegeben. Um die Verstärkung bei dazwischen liegenden Frequenzen zu ermitteln müssen Sie interpolieren. Zur Vereinfachung interpolieren Sie die dB-Werte einfach linear.

Frequenzbereich 400...1200 MHz	
Einfügedämpfung @ 400 MHz	1 dB
@ 1200 MHz	4 dB
-0,5dB-Bandbreite	10 MHz
-20dB-Bandbreite	30 MHz
-60dB-Bandbreite	80 MHz
Sperrdämpfung	60 dB
Kosten	10 €

Bandpaßfilter in Streifenleitungstechnik

Bei Mikrowellenfrequenzen lassen sich Bandpaßfilter sehr preiswert mittels verschiedener , geeigneter Strukturen in Streifenleitungstechnik auf der Leiterplatte herstellen. Wegen der begrenzten Güte dieser Strukturen und wegen der mechanischen Toleranzen sind nur sehr breitbandige Filter mit nur flachen Flanken möglich. Zur Definition der Flankensteilheit sind die Filterbandbreiten bei verschiedenen Dämpfungen angegeben. Dazwischen werde linear interpoliert. Der Übertragungsbereich des Filters sei symmetrisch um die Mittenfrequenz. Für die weitere Arbeit kann es hilfreich sein, sich die Filterkurve schematisch zu skizzieren.

Frequenzbereich 3...7 GHz	
Einfügedämpfung	-3,5 dB
-1dB-Bandbreite	500 MHz
-20dB-Bandbreite	1,2 GHz
-40dB-Bandbreite	2,2 GHz
Sperrdämpfung	40 dB
Kosten	0 €

Hoch- und Tiefpaßfilter in Streifenleitungstechnik

Bei Mikrowellenfrequenzen lassen sich Hoch- und Tiefpässe sehr preiswert mittels geeigneter Strukturen in Streifenleitungstechnik auf der Leiterplatte herstellen. Dabei lassen sich im genannten Frequenzbereich geringere Einfügedämpfungen erreichen, als bei oben genannten Bandpaßfiltern. Zur Definition der Flankensteilheit sind Dämpfungswerte bei Frequenzen einige Prozent oberhalb/unterhalb der Grenzfrequenz f_g angegeben. Dazwischen werde linear interpoliert. Für die weitere Arbeit kann es hilfreich sein, sich die Filterkurve schematisch zu skizzieren.

Frequenzbereich 1...7 GHz			
Tiefpaß		Hochpaß	
-1 dB	$f_g - 10\%$	-1 dB	$f_g + 10\%$
-3 dB	f_g	-3 dB	f_g
-20 dB	$f_g + 20\%$	-20 dB	$f_g - 20\%$
-60 dB	$f_g + 30\%$	-60 dB	$f_g - 30\%$
Sperrdämpfung	60 dB	Sperrdämpfung	60 dB
Kosten	0 €	Kosten	0 €

Bandpaßfilter mit abstimmbarer Mittenfrequenz

Im Frequenzbereich 30 MHz bis 1,5 GHz lassen sich Bandpaßfilter aus gekoppelten LC-Kreisen realisieren, deren Mittenfrequenz mit Kapazitätsdioden verstimmt werden kann. Der nutzbare Abstimmbereich beträgt 1,5 Oktaven. Nachteil der Filter ist eine geringe Flankensteilheit und eine geringe Dämpfung im Sperrbereich. Die Bandbreite B der Filter ergibt sich aus der angegebenen Betriebsgüte Q_B gemäß

$$Q_B = \frac{f_m}{B}. \text{ Dabei ist } f_m \text{ die Mittenfrequenz des Durchlaßbereiches.}$$

Die Betriebsgüte der Filter ist abhängig von der Mittenfrequenz des Durchlaßbereiches. Es sind in der Tabelle nur Stützwerte angegeben. Um die Betriebsgüte bei dazwischen liegenden Frequenzen zu ermitteln müssen Sie interpolieren. Zur Vereinfachung interpolieren Sie die dB-Werte einfach linear. Zur Definition der Flankensteilheit sind Dämpfungswerte bei Frequenzen einige Prozent oberhalb/unterhalb der Grenzfrequenz f_g angegeben. Dazwischen werde linear interpoliert. Für die weitere Arbeit kann es hilfreich sein, sich die Filterkurve schematisch zu skizzieren.

Frequenzbereich 30 MHz ... 1,5 GHz	
Einfügedämpfung	-2 dB
Abstimmbereich	1,5 Oktaven
Betriebsgüte Q_B	
@ 30 MHz	3
@ 1,5 GHz	10
-0,5 dB Bandbreite	B
-10 dB Bandbreite	4 B
-30 dB Bandbreite	12 B
IIP2	70 dBm
IIP3	50 dBm
Sperrdämpfung	30 dB
Kosten	4,50 €
Leistungsumsatz	10 mW

AD-Wandler

Typ	ADC01	ADC02
Max. Abtastrate	80 MHz	80 MHz
Auflösung	14 Bit	14 Bit
Full-Scale Eingangsleistung	-2 dBm	-2 dBm
Rauschmaß	35 dB	35 dB
IIP3	35 dBm	47 dBm
IIP2	69 dBm	80 dBm
Leistungsumsatz	230 mW	1200 mW
Kosten	23,50 €	31,80 €

Lokaloszillatoren

Zur Vereinfachung der Aufgabenstellung stehen Ihnen Lokaloszillatoren in beliebiger Frequenz zur Verfügung. Bitte verwenden sie maximal einen Lokaloszillator mit variabler Frequenz, darüber hinaus nur feststehende.

Lokaloszillatoren werden üblicherweise durch ganzzahlige oder nicht-ganzzahlige Vervielfachung eines Referenzoszillators erzeugt (meist mittels verschachtelter Phasenregelschleifen). Das Signal eines realen Oszillators ist nie spektral rein, sondern immer mit sogenanntem Phasenrauschen behaftet. Dieses Rauschen ist um so stärker, je geringer der Frequenzabstand zum Träger ist. Das Phasenrauschen eines Oszillators wird in dBc/Hz angegeben, also als Rauschleistungsdichte in Relation zur Leistung des Trägersignals. Zusätzlich muß immer noch der Frequenzabstand zum Träger angegeben werden, also z.B. ein Offset von 10kHz.

Für einen Überwachungsempfänger ist das Phasenrauschen der eigenen Lokaloszillatoren eine wichtige Kenngröße. Alle empfangenen Signale werden vom Mischer mit eben diesem eigenen Phasenrauschen beaufschlagt. Das Phasenrauschen, mit dem der Empfänger ein starkes Empfangssignal beaufschlagt, kann ein im Nachbarkanal liegendes, weiteres Signal verdecken. Da mit Überwachungsempfängern häufig sehr schwache Signale bei gleichzeitiger Anwesenheit starker, bekannter Signale gesucht werden, muß das Phasenrauschen der Lokaloszillatoren so klein wie möglich sein. Das Phasenrauschen eines Signals steigt bei dessen Frequenzvervielfachung an. Um das Phasenrauschen klein zu halten, sollten Sie folglich nicht zu hohe LO-Frequenzen wählen!

Folgende Parameter sind für die Wahl der Lokaloszillatoren und des AD-Wandler-Taktes zu beachten:

Frequenz	10 MHz ... 10 GHz
Pegel	Nehmen Sie an, die Lokaloszillatoren hätten bereits die für Ihre ausgewählten Mischer angemessene Signalleistung.
Phasenrauschen	<p>Der Empfänger habe einen Referenzoszillator der Frequenz 100 MHz. Dieser Oszillator rauscht mit -145dBc/Hz bei 10 kHz Offset. Das Phasenrauschen steigt mit zunehmender Frequenz mit 20dB/Dekade an.</p> <p>Beispiel: Hätte Ihr Lokaloszillator eine Frequenz von 1 GHz, würde er bei 10kHz Offset ein Phasenrauschen von -125 dBc/Hz aufweisen. Hätte Ihr Lokaloszillator eine Frequenz von 10 MHz, würde er bei 10kHz Offset ein Phasenrauschen von -165dBc/Hz aufweisen.</p>

Berechnen Sie für alle Ihre Lokaloszillatoren das Phasenrauschen bei 10kHz Offset.

Zur Berechnung des gesamten Phasenrauschens addieren Sie die einzelnen Werte unter der vereinfachenden Annahme, daß die Oszillatoren nicht korreliert sind. (Die Addition erfolgt natürlich linear, nicht in dB!)